INVESTIGACION y CIENCIA

¿QUE DEBE APRENDERSE EN LA SEGUNDA ENSEÑANZA?

EINSTEIN Y LOS AGUJEROS NEGROS

EXPOSICION AL SOL Y CANCER DE PIEL

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

EL PELIGRO DE LAS MINAS ABANDONADAS



AGOSTO 1996
800 PTAS.





Agosto de 1996 Número 239

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES



Portada: Daniel Adel

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-7	Emergency Archive
8-9	Emergency Archive (*fotografías*); Pamela Blotner, The Arms Project/ PHR (*dibujos*)
10-11	Boris Starosta
12	P. Favard y M. Djabourov (*izquierda*); F. Gaill (*derecha*)
13	R. Audebert y M. Djabourov
14-16	PLS
17	Lothar Brendel
18	SBI
20-24	PLS
40	Agencia de Comunicación Internacional, cortesía del Archivo Visual Emilio Segrè; Archivo Bettmann; Jared Schneidman Design (dibujo); UPI/Bettmann
42	Robert Bein, AIP Archivo Visual Emilio Segrè; Ins. Max Planck, cortesía de AIP; UPI/Bettmann; AIP Archivo Visual Emilio Segrè
43	UPI/Bettmann; AIP Archivo Visual E. Segrè; UPI/Bettmann
44	Archivo Bettmann; JSD (*dibujo*); UPI/Bettmann
46-47	Ron Testa, Museo Field de Historia Natural; Museo Americano de Historia Natural; Depto. Servicio Biblioteca (*arriba*)
48-49	M. A. de Historia Natural
50	M. A. de Historia Natural (*arriba*); Don Hamerman, M. A. de Historia Natural (*abajo*)
51	M. A. de Historia Natural (*arriba*); Ron Testa, Museo Field de Historia Natural
52	John Weinstein, Museo Field de Historia Natural (*arriba*); M. A. de Historia Natural (*abajo*)
54-55	Roger Ressmeyer, *Starlight*
56-57	Roberto Osti
58	Nuclear Waste Management R&D Group, Lab. Nac. de Los Alamos
59	Depto. de Energía de EE.UU.
60	Jason Goltz
62	Consejo Anti-cáncer de Victoria
63	Audra Geras
64-65	Laurie Grace
66	Laboratory for Atmospheres; NASA Goddard Space Flight Center; Inst. Nac. del Cáncer; Laurie Grace
70-71	NASA
72	Ian Worpole
73	Boeing Defense and Space Group
74	Mike McCormick, Boeing
76	Cortesía de NASA y Agencia Espacial rusa
84	Bryan Christie
85-87	Johnny Johnson
88	Bryan Christie (*arriba*); Johnny Johnson (*abajo*)

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

J. Vilardell: *La tragedia de las minas contrapersonal*, *Hace...*, *Taller y laboratorio* e *Ideas aplicadas*; Claudi Mans: *Los geles, líquidos que no fluyen*; Antoni Malet: *El padre renuente de los agujeros negros*; Luis Bou: *¿Qué debe enseñarse en el bachillerato?*, *El arte pictórico de Charles R. Knight*, *De cerca* y *Juegos matemáticos*; Juan Pedro Campos: *Almacenamiento de residuos nucleares*; Esteban Santiago: *Radiación solar y cáncer de piel*; Mónica Murphy: *Ciencia en el firmamento*; Angel Garcimartín: *Perfiles*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Marguerite Holloway, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Associate Editor*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; Corey S. Powell; David A. Schneider; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam; Glenn Zorpette
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	9.700	17.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

—En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13





ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 – 08907 L'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotocayfo, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Se ha opinado que el magnesio acabará sustituyendo al hierro como materia prima esencial en la construcción civil. Es plausible, pues, que a las próximas épocas humanas las llamemos “edad del magnesio”. Este elemento parece ser el único material “básico” cuyas reservas resultan inagotables: un kilómetro cúbico de agua marina contiene más de una tonelada del metal en forma de cloruro magnésico. Es el más liviano de los metales estructurales y el “peligro de incendio” que se le atribuye sólo debe tenerse en cuenta si se maneja fundido o en polvo fino. No obstante, aun cuando llegara a convertirse en la materia prima fundamental no lo sería, a buen seguro, hasta dentro de siglos. Sus competidores (hierro y acero, aluminio y plástico estructural) tendrían que alcanzar un estado de agotamiento y precios elevados.»

...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «La Compañía del Ferrocarril de la Tercera Avenida, de Nueva York, ha mostrado interés por el motor de aire comprimido y ha adoptado el sistema inventado por el señor R. Hardie. En sistemas anteriores, cuando el aire se expandía desde los calderines, era tal la consiguiente reducción de temperatura que provocaba la congelación y obturación de los conductos de paso. En el sistema de Hardie, los coches, uno de los cuales se ilustra, presentan una aspecto general similar a un tranvía ordinario. Pero bajo los asientos hay dieciséis depósitos de aire comprimido, recipientes de acero laminado de 23 centímetros de diámetro y más de seis metros de largo, y un tanque de agua caliente, que sirve para calentar el aire antes de que entre en los dos cilindros del motor, salvando así el inconveniente de la congelación del aire descargado.»

«Declara Nikola Tesla que los rayos Roetgen producidos por el tubo de Crookes son partículas materiales. Afirma el señor Tesla que “el chorro catódico se reduce a una forma primaria de materia no conocida hasta el presente.”»

«El doctor Fridjof Nansen, explorador noruego del Artico, ha alcanzado la latitud de 86 grados y 14 minutos, la más septentrional de las logradas hasta ahora en la pugna por llegar al polo. Expone el doctor Nansen: “A los 78 grados y 50 minutos de latitud norte dejamos que nuestro barco, el Fram, quedase atrapado en el hielo. Tal como se esperaba, anduvimos a la deriva hacia el noroeste durante el otoño y el invierno. El teniente Johansen y yo abandonamos el barco el catorce de marzo de 1896, para explorar en dirección norte y llegar a la latitud más alta posible. Disponíamos de veintiocho perros, dos trineos y dos kayaks por si aparecían trechos de agua líquida. Sin embargo, el siete de abril el hielo se había hecho tan accidentado que consideré imprudente continuar.” Se dirigieron hacia el sur y tras un invierno viviendo de carne de oso y morsa en una casa de piedra que se construyeron, los dos exploradores fueron recogidos por el vapor Windward en la costa de la Tierra de Franz Josef.»



Coche de aire comprimido Hardie

...ciento cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Merced a un magnífico y potente telescopio, proporcionado por Lord Ross, de Irlanda, la Luna ha estado sometida al más crítico de los exámenes hechos hasta ahora. Se afirma que no había vestigios de restos arquitectónicos que indiquen que nuestro satélite esté habitado, o lo haya estado, por una raza de mortales semejante a nosotros. La Luna no ofrecía señal alguna de contener nada parecido a los verdes campos y amables verdores de este hermoso mundo nuestro. No había agua visible, ni un río, ni siquiera una balsa suficiente para alimentar una factoría, y todo aparecía desolado.»

«Se sabe perfectamente que hay una emisión constante de hidrógeno procedente de la descomposición de diversas sustancias; y que ese gas, siendo más ligero que el aire, tiende a elevarse hacia la atmósfera. Según una opinión, no cabe por tanto ninguna duda de que esta inflamable sustancia abunda en la regiones superiores y que una chispa eléctrica envolvería el mundo en llamas. La única circunstancia que impide tal conflagración es que la región de electricidad excitable se encuentra a kilómetros por debajo de la del gas inflamable.»

«Sopa homeopática: Tómense dos pichones que se hayan matado de hambre, cuélgueselos de un cordel en la ventana de la cocina, de tal suerte que el sol arroje la sombra de los pichones en una olla de hierro puesta al fuego con unos cuatro litros de agua. Hiérvase la sombra a fuego lento durante diez horas, y seguidamente dése al paciente una gota en un vaso de agua cada diez días.»

La tragedia de las minas contrapersonal

Las minas terrestres matan o mutilan a más de 15.000 personas cada año. La mayoría de las víctimas son civiles inocentes, entre ellas un número muy alto de niños. Pese a lo cual, cada día se siguen sembrando por millares

Gino Strada

Por fin, en Ruanda el terrible derramamiento de sangre había concluido. Alphonsine y su familia regresaban a su hogar cuando la niña pisó una mina camuflada. En el hospital de Kigali, regido por EMERGENCY, una organización asistencial, otros médicos y yo hicimos cuanto pudimos para curar las lesiones. La explosión había destrozado las piernas de Alphonsine y fracturado su antebrazo izquierdo. Hubo que amputar ambas piernas por encima de las rodillas. Su hermana sufría una herida penetrante en el cerebro producida por un fragmento metálico; no llegó a recuperar el conocimiento y murió seis horas después de la intervención. Su padre, que iba rezagado unos metros de distancia de las dos niñas, presentaba sólo pequeñas heridas múltiples en el pecho.

En mi calidad de cirujano de EMERGENCY, he tratado a numerosos niños como Alphonsine y su hermana, víctimas de una nueva clase de guerra. En su gran mayoría, los conflictos modernos no son entre países, sino domésticos: guerras civiles, luchas secesionistas, "limpiezas" étnicas y raciales o campañas terroristas. Hay auténticos ejércitos de soldados irregulares que, sin uniforme, luchan con armas devastadoras en medio de zonas densamente pobladas. Para evitar ser descubiertos, muchos grupos armados se mezclan con la población. A veces, emplean incluso a los civiles como parapetos. En numerosísimas ocasiones, la estrategia militar de un ejército se basa en emplear a grupos civiles como blancos y aterrorizarlos.

Todo ello ha determinado que la población civil haya venido a ocupar los primeros puestos entre las víctimas de la guerra. En la primera guerra mundial, los civiles representaron sólo el 15 por ciento de las bajas, pero al final de la segunda el porcentaje se había elevado al 65 por ciento, incluidos los muertos en el Holocausto. En las hostilidades de hoy día, más del 90 por ciento del total de heridos son civiles. Estas cifras están confirmadas por numerosos centros de investigación, entre ellos el Instituto de Investigación para la Paz Internacional, de Estocolmo, y su homónimo de Oslo, y por las organizaciones humanitarias comprometidas en la asistencia a las víctimas.

Uno de los aspectos más dramáticos de tan catastrófico cambio es el uso cada vez más generalizado de minas contrapersonal. Armas tan inhumanas plantean una amenaza indiscriminada y persistente. Las minas terrestres no



distinguen entre el pie de un combatiente y el del niño que está jugando; tampoco reconocen la suspensión de las hostilidades ni los acuerdos de paz. Una vez sembradas, pueden mutilar o matar decenios después de terminado el conflicto. Por esta causa, se ha llamado al artilugio “arma de destrucción masiva a cámara lenta”.

GINO STRADA estudió la carrera de medicina en la Universidad de Milán. En 1988 entró en el Comité Internacional de la Cruz Roja destinado en Pakistán. Desde entonces ha trabajado como cirujano de guerra. Ha tratado a víctimas de minas terrestres en Afganistán, Camboya, Perú, Bosnia, Djibuti, Somalia, Etiopía, Ruanda y el norte de Irak. En 1994 fundó EMERGENCY, asociación humanitaria para atender a las víctimas civiles de la guerra. EMERGENCY tiene la sede en vía Bagutta 12, 20121 Milán, Italia; teléfono 39-2-7600-1104; fax 39-2-7600-3719.

Las minas se han venido utilizando de formas diversas desde comienzos de siglo. Con los años, sin embargo, el arte militar ha evolucionado para hacer un uso más ingenioso de ellas. Ya no se limitan a constituir armas que impiden al enemigo acceder a ciertos terrenos, con las que se pretende embarrancar o encauzar los movimientos de las tropas adversarias, o proteger determinadas instalaciones clave. Ahora se colocan muchas veces para privar a una población local del acceso a los recursos de agua, leña, combustible, caminos e incluso a cementerios. En muchos países se han empleado helicópteros, artillería y otros medios a distancia para esparcir minas al azar sobre pueblos o tierras cultivadas como actos deliberados de terrorismo contra la población civil.

En términos técnicos, una mina contrapersonal (mina CP) es un artefacto concebido para matar o mutilar a la persona que la accione. (En contraste, las minas antitanque, minas AT, están específicamente concebidas para volar carros de combate y vehículos. Sólo estallan cuando las comprime algo que pese cientos de kilogramos.) Las minas CP son por lo general de tamaño más bien reducido, frecuentemente de menos de 10 centímetros de diámetro, y difíciles de detectar. En algunos casos, el color y la forma de la mina facilitan su camuflaje y resulta indistinguible a primera vista.

La mina terrestre se activa cuando la víctima acciona la espoleta, por presión directa sobre la misma mina o sometiendo a tracción un cable de disparo. Esa acción enciende al detonador, que a su vez activa al multiplicador, una pequeña carga de alto explosivo. Por fin, la detonación del multiplicador explosiona la carga principal de la mina.

En los últimos años, la técnica de las minas ha evolucionado de modo importante. El desarrollo de las minas de plástico, así como de otras que contienen una mínima cantidad de metal, las ha convertido en armas más baratas, más fiables, más duraderas y más difíciles de detectar y desmontar. Por su lado, los sistemas de despliegue a distancia (helicópteros y otros) han posibilitado lanzar miles de minas sobre una gran extensión de terreno en cuestión de sólo minutos. Semejante siembra de minas impide registrar el lugar exacto donde toman tierra, lo que dificulta todavía más su recuperación.

Por desgracia, la técnica de las minas terrestres es muy sencilla y su coste muy bajo (la mayoría de ellas cuestan entre 500 y 2000 pesetas). De ahí que en los últimos años las han fabricado y vendido un número creciente de países, incluidos muchos del mundo en vías de desarrollo. Aproximadamente 50 países han producido y exportado minas contrapersonal. En el mercado se ofrecen hoy más de 350 modelos, no sólo a los ejércitos regulares, sino, sobre todo, a grupos guerrilleros y facciones armadas de todo el globo.

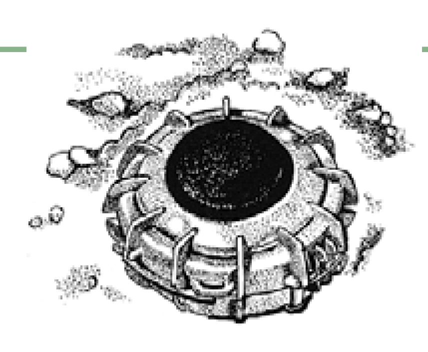
Se desconoce el número de minas sin estallar colocadas. Según fuentes



1. MINA SB-33, a tamaño natural. Se disimula entre los cantos con tal perfección que resulta casi indistinguible. Cuando una persona pisa una de estas minas de voladura, la explosión resultante le volará el pie o la pierna. Muchas minas contrapersonal se fabrican en formas y colores que facilitan su camuflaje una vez sembradas.

Patrones de lesiones

LAS LESIONES DE PATRON A, que sufre el muchacho de la fotografía inferior, suelen causarlas las minas de voladura pequeñas, tales como la VS-50 que se muestra a la derecha. Estas armas, de menos de 10 centímetros de diámetro, casi siempre arrancan un pie o una pierna, según como se pisen. Rara vez producen heridas por encima de la rodilla o en la otra pierna.







de las Naciones Unidas, el Departamento de Estado de EE.UU. y diversas agencias humanitarias, habrá al menos 100 millones repartidas en 64 países. Ahora bien, dado que es corriente que ni los fabricantes ni los usuarios guarden registros, esas cifras probablemente infravaloran la situación real. Cualquiera que sea el caso, es innegable que una importante fracción del mundo sufre de lo que podría considerarse “contaminación por minas terrestres”.

Los organismos que prestan asistencia a las víctimas o colaboran en las operaciones de limpieza de minas estiman que durante los dos últimos decenios esas armas han matado o mutilado a 15.000 personas cada año. De esas víctimas, aproximadamente el 80 por ciento eran civiles. Es muy probable que el número real sea mayor, dado que muchos accidentes ocurren en zonas remotas sin instalaciones médicas, para los que no hay registro documental. En una zona minada, muchas actividades cotidianas (buscar leña o alimentos, sacar agua de un pozo, cultivar la tierra, jugar, cuidar del ganado) se convierten en tareas de alto riesgo. Yo mismo he atendido a 1950 personas heridas por minas; de ellas, el 93 por ciento eran civiles y el 29 por ciento eran niños de menos de catorce años.

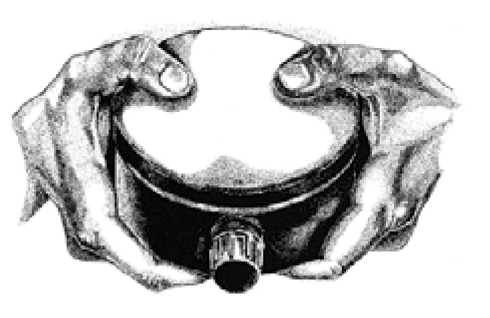
A efectos prácticos podemos dividir las minas contrapersonal en dos grandes grupos: minas de voladura y minas de fragmentación. Las primeras acostumbran reaccionar a una presión, por ejemplo, la de un pie que pisa una placa sensible; producen unas heridas que son consecuencia directa de la misma explosión. Las minas de fragmentación suelen activarse por cables de disparo. Cuando estallan, un gran número de esquirlas metálicas salen proyectadas hasta una distancia considerable. Esa metralla estaba encerrada en la propia mina o resulta del troceo de la vaina externa.

El tipo de mina, su mecanismo de explosión, su ubicación en el terreno, la posición de la víctima y las características del entorno inciden en la naturaleza y extensión del daño causado. Las víctimas sufren una amplia gama de heridas, que podemos reducir a cuatro patrones generales. Para entender hasta qué punto son realmente espantosas esas armas, hay que conocer lo que hacen y cómo lo hacen.

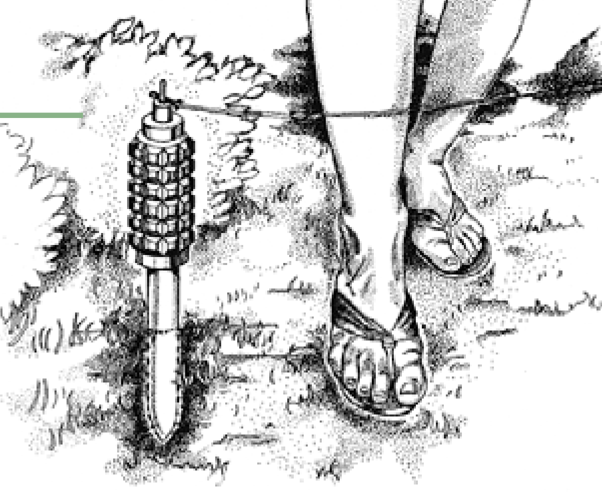
Las minas de voladura pequeñas, de diámetro inferior a 10 centímetros, producen un patrón de lesiones muy corriente que llamamos patrón A. Entre las minas más corriente de este grupo se cuentan las minas de siembra a voleo italianas TS-50 y SB-33 y las de siembra manual VS-50 y VAR-40, la M14 de fabricación norteamericana y la Tipo 72 china. Estas armas amputan el pie o la pierna. A veces, quizá se pierda sólo una parte del pie, según estuviera colocada la mina y la forma en que se pisó. En la mayoría de los casos, las heridas producidas por las minas de este tipo caen por debajo de la rodilla, sin que se presenten lesiones de importancia en puntos más altos del cuerpo o en la otra pierna.

Las minas de voladura de mayor tamaño, citemos las rusas de la serie PMN, suelen ocasionar un tipo de herida distinto (patrón B). La diferencia se debe en parte a la diversidad de tamaños. El diámetro de la “pequeña” VS-50 es de 9 centímetros, mientras que el de una PMN es de 11,2 centímetros. En ambas minas, las ondas de choque se propagan hacia fuera a la misma velocidad, unos 6800 metros por segundo, siete veces la velocidad de una bala celerísima. Pero el cono de la explosión, o sea, el volumen que transporta la fuerza explosiva, es mucho más ancho en la mina mayor. Además, las minas grandes contienen más cantidad de explosivo de redoblado poder. Por ejemplo, una VS-50 contiene 42 gramos de RDX-TNT; una PMN-2, 150 gramos de TNT; y una PMN, 240 gramos de TNT.

Las víctimas que pisan una de esas grandes minas contrapersonal sufren una amputación traumática. Muy a menudo, vuela la parte inferior de la pierna. Una porción de la tibia puede sobresalir del muñón y los múscu-







LAS LESIONES DE PATRON B, sufridas por algunos de los niños que aparecen en la foto de la izquierda en el hospital de la Cruz Roja de Kabul (Afganistán), resultan cuando se pisan minas contrapersonal tales como la PMN (*arriba*). Estas minas no son mucho mayores que las minas de voladura pequeñas, pero contienen mucha más cantidad de explosivo. Como resultado, suelen amputar la parte inferior de la pierna y causan más daños a los muslos, genitales y nalgas.



LAS LESIONES DE PATRON D indican que una persona ha disparado una mina de fragmentación, tal como la mina "de estaca" POMZ-2 que se muestra arriba. Estas minas acostumbran matar a quien entre en contacto directo con ellas, descargando esquirlas metálicas sobre una extensa zona.

LAS LESIONES DE PATRON C las produce la mina PFM-1, llamada mina mariposa (*izquierda*). Estas minas no estallan hasta que se haya aplicado una compresión acumulativa suficiente en sus alas, las cuales facilitan su planeo hasta el suelo tras haberlas arrojado desde un helicóptero. Como suelen estallar cuando se las manipula, amputan dedos o manos y dañan también la cara y el pecho. Casi todas las víctimas son niños, como el de la ilustración de arriba, atraídos por su aspecto de juguete.

los remanentes quedan aplastados y empujados hacia arriba, confiriendo a la herida un grotesco aspecto de coliflor. En ocasiones, se pierden la mitad inferior de la pierna y la rodilla. Con frecuencia se sufren grandes heridas en el muslo, los genitales o las nalgas. En muchos pacientes, la otra pierna presenta también daños, con heridas o fracturas abiertas. Como resultado, a veces se pierden porciones de ambas piernas. Son asimismo bastante corrientes heridas penetrantes en el abdomen o el pecho.

La PFM-1 rusa, la llamada mina mariposa, produce un tercer patrón de lesiones (patrón C). Debe ese poético apodo a las pequeñas alas que luce y que le permiten planear hasta tierra cuando se la suelta desde un helicóptero. Durante el conflicto afgano se lanzaron en cantidades enormes. Se trata de un artilugio diabólico, pues la PFM-1 es una "mina juguete", un arma disfrazada de tal. Aunque la industria militar insiste en que la forma de la PFM-1 viene determinada por su función, nadie puede negar el atractivo que encierra para los niños.

Se caracterizan estas minas por actuar merced a la deformación de las alas o a una compresión acumulativa sobre las mismas; en otras palabras, no siempre estallan a la primera. En Afganistán nos contaron varios episodios de niños que habían encontrado una mariposa (o "loro verde", como allí la llaman) y jugado con ella durante horas con sus amigos antes de que sobreviniera la explosión. Parece, pues, que el nombre de "mina juguete" está totalmente justificado. Según la experiencia quirúrgica de nuestro grupo, entre las más de 150 víctimas de este tipo de mina que tratamos no se contaba ni un solo adulto.

Técnicamente, la PFM-1 no es sino un tipo más de mina de voladura de siembra a voleo de pequeño tamaño, pero por la peculiaridad de los daños que causa, merece una descripción aparte. Por lo común, la PFM-1 se tiene en la mano cuando estalla, por lo que amputa traumáticamente una o las dos manos desde la muñeca. En casos menos graves, sólo destruye dos o tres dedos. Muy a menudo el estallido produce daños adicionales en el pecho y la cara. Son muy corrientes las heridas en un ojo o en los dos, produciéndose ceguera parcial o total.

Las minas contrapersonal de fragmentación producen el cuarto patrón de lesiones (patrón D). Dentro de este grupo se encuentran las minas de fragmentación "de rebote", tales como la italiana Valmara-69, las estadounidenses de la serie M16 y las rusas de la serie OZM. Estas armas se siembran en el terreno pero, al accionarse, saltan al aire antes de estallar, de suerte que sus fragmentos pueden dispersarse con el máximo alcance y el máximo efecto letal. En esta clase de armas se cuentan asimismo las minas de fragmentación direccionales, incluidas la estadounidense M18A1 (o "Claymore") y las minas "de estaca" rusas MON y POMZ, las cuales apuntan sus proyectiles hacia un blanco. Una característica común a todas ellas es que actúan mediante un cable de disparo.

La característica definitoria de las minas de fragmentación es que proyectan cascos metálicos sobre una zona extensa. La Valmara-69, por ejemplo, estalla a una altura de 50 a 100 centímetros, más o menos al nivel de la cintura de un hombre, y lanza unos 1000 trocitos de metralla metálica esparciéndolos en círculo. Los especialistas consideran que estas minas tienen una "zona mortal" de unos 2,5 metros y una "zona de heridas" de hasta 200 metros.

Las minas de fragmentación producen heridas en todo el cuerpo. El alcance de la herida depende en parte del tamaño de la esquirla que penetró. Si la víctima se halla a metros de distancia del lugar de la explosión, los fragmentos penetrarán en el abdomen, el pecho o el cerebro, en especial si la mina era de rebote. A distancias menores, las heridas se asemejan a las del patrón B. No obstante, los médicos no suelen llegar a tiempo de tratar amputaciones traumáticas debidas a minas de fragmentación porque éstas

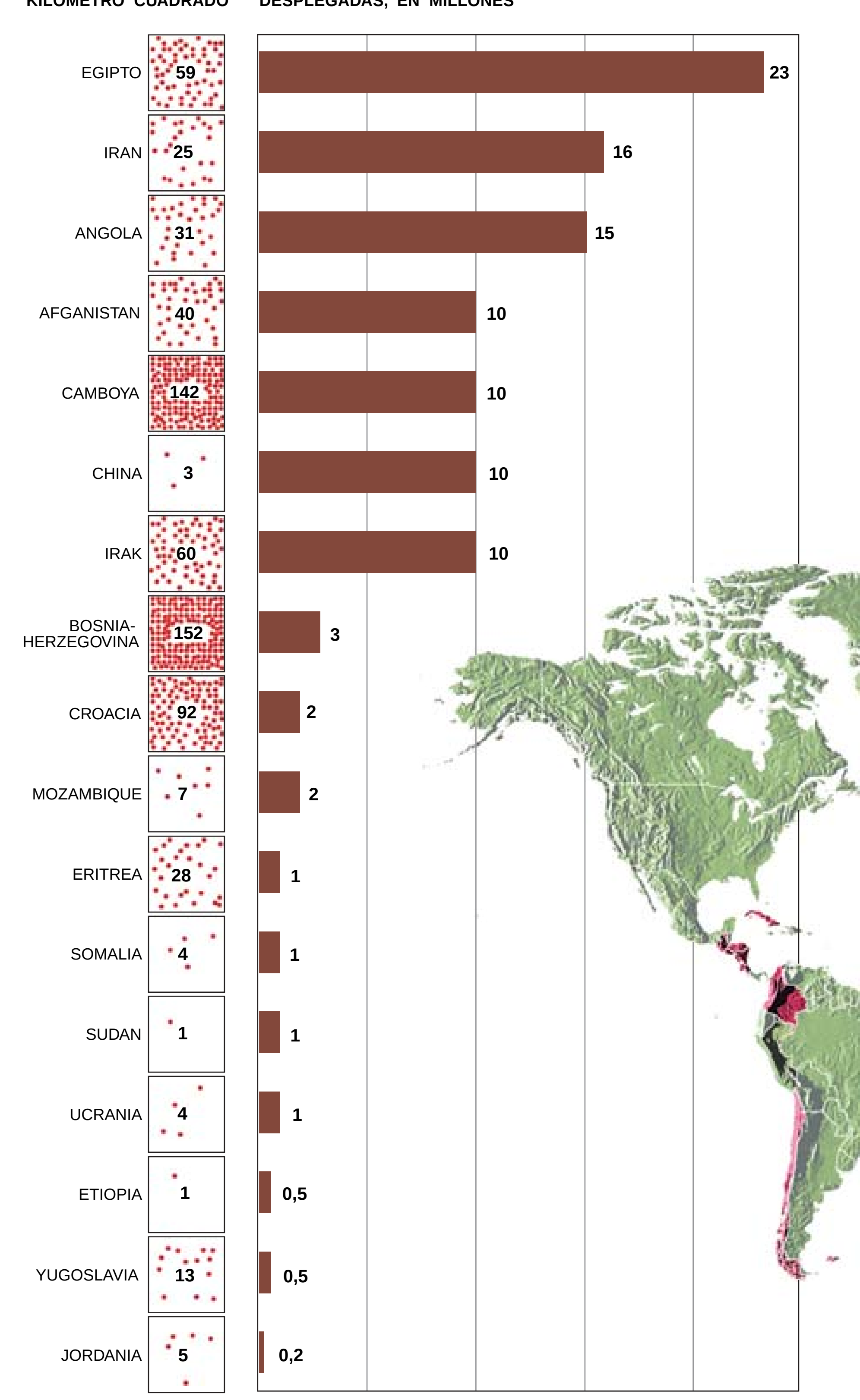
suelen matar al instante a quien las accione por contacto directo.

En el norte de Irak, durante la guerra del Golfo Pérsico, tuvimos ocasión de observar seis bajas por explosión de una Valmara-69. Las dos personas que intentaron desespoletar la mina para recuperar su contenido de aluminio (que valía un dólar en el mercado local) murieron en el acto. A la vez, otras cuatro personas que se encontraban próximas, dos de ellas jóvenes pastores, sufrieron heridas graves. Sólo dos sobrevivieron.

Los patrones de heridas que he descrito identifican la distribución de heridas predominante que puede sufrir un paciente, pero no guardan una correspondencia lineal con los niveles de gravedad. Una amputación traumática del pie con sólo una pequeña herida en el muslo (una baja de patrón A) podría suponer una amenaza para la vida si la herida en el muslo interesara la arteria femoral. Lo habitual es que un paciente que sufra una herida de mina terrestre se halle en situación crítica. Muchas veces estará directamente afectada alguna estructura vital, o bien las heridas (incluidas las amputaciones traumáticas) son tan extensas, que el paciente está bajo el peligro de shock hemorrágico. En una situación de emergencia así, el identificar un patrón de lesiones con una categoría específica de mina terrestre puede brindar una información muy útil al equipo quirúrgico (y también al personal responsable de la limpieza de la zona minada).

Por varias razones, la cirugía de las lesiones por minas terrestres es una disciplina compleja y dificultosa. Muchas veces los equipos médicos deben trabajar en zonas peligrosas donde prosiguen los combates. A la precariedad habitual de las instalaciones disponibles se suman la escasez de recursos, la falta de higiene adecuada y, a veces, incluso la ausencia de agua y electricidad. Si tanta menesterosidad convierte en ardua la tarea del cirujano, éste debe, además, hallarse preparado para hacer frente a toda clase de emergencias: vasculares, torácicas, abdominales, ortopédicas, etc. Los fragmentos de hueso, por ejemplo, pueden devenir "balas secundarias". En cierta ocasión tuve que reconstruir la arteria axilar del hombro de un paciente que la había seccionada un trozo de hueso procedente del pie, amputado traumáticamente, del mismo paciente.

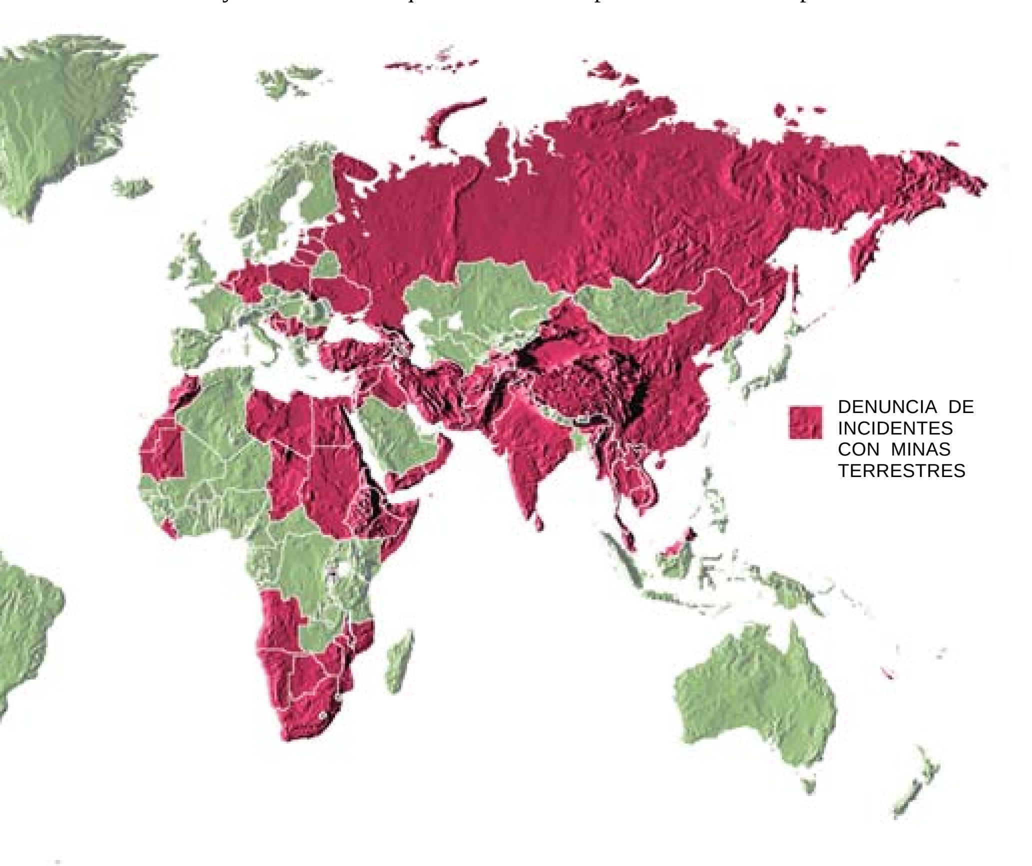
Desde el punto de vista técnico, la piedra angular de esta cirugía es el



2. EN EL MAPA de la derecha figuran en rojo los países que informan de incidentes con minas terrestres. El diagrama de barras muestra el número de minas plantadas en la región correspondiente sólo cuando se conoce esa estimación. En los recuadros (*izquierda*) se indica la densidad del despliegue de minas medida en función del número medio de minas por kilómetro cuadrado.

desbridado, o limpieza quirúrgica, de la herida. Cuando estalla una mina de voladura, la explosión en su ascenso puede introducir profundamente en los tejidos piedras, barro, hierbas y hasta trozos de la ropa y calzado del infortunado. La extracción de esos cuerpos extraños y, aún más importante, la escisión de todos los tejidos muertos, moribundos o debilitados son de importancia suprema para evitar infecciones posquirúrgicas que pongan en peligro la vida.

La mayoría de los que se recobran de una mina nunca vuelven a recuperar del todo su capacidad para tomar parte activa en la vida familiar o social. Rehabilitar esos pacientes suele resulta harto problemático. Muchas víctimas viven en países en vías de desarrollo, donde las duras condiciones dificultan aún más el restañamiento físico y psíquico. Además de los terribles costes en vidas y sufrimientos que las minas



onerosas cargas sociales y económicas en sociedades y naciones enteras. La decisión de un ejército de minar campos de labranza comporta unos efectos devastadores a largo plazo para las comunidades agrícolas cuya supervivencia depende de la tierra. Además, el miedo a minas disuade a los refugiados de regresar a sus hogares. La gente desplazada tiende a convertirse en refugiados permanentes que recargan las estructuras económicas y sociales de las regiones a las que huyen.

En 1980, la ONU adoptó la Convención sobre Armas Inhumanas. Aunque ese convenio y sus protocolos se proponía garantizar la protección a los civiles, los hechos acabaron por demostrar la insuficiencia de esa normativa. En los últimos años, más de 400 organizaciones humanitarias de casi 30 países han lanzado una campaña para concienciar a la comunidad internacional sobre los devastadores efectos de las minas contrapersonal. Para ello han apremiado a la ONU y a los gobiernos nacionales para que proscriban la producción, el almacenamiento, la venta, la exportación y el empleo de minas. La campaña ha rendido unos buenos resultados y varios países han decidido detener la producción o la exportación de minas

En septiembre de 1995 se celebró en Viena una conferencia para la revisión de la Convención. La diplomacia internacional centró la discusión en diversos aspectos técnicos y militares del uso de las minas terrestres. Desde un punto de vista humanitario, la conferencia de Viena fue un fiasco. La única solución verdadera, es decir, la prohibición absoluta de esas armas indiscriminantes, ni siquiera se tomó en consideración. Cierto es que la mayoría de los países y ciudadanos del mundo reconocen ya los horrores de las bombas atómicas. Asombra que esas mismas naciones no se opongan a la matanza diaria de civiles que producen las minas contrapersonal.

Sin embargo, el mundo se enfrenta a un legado terrible. Muchas de las minas sembradas hace decenios podrían persistir siglos. Desde luego, aunque ya no se sembraran más minas en el futuro, las que ya están colocadas causarán tragedias colosales y pondrán a prueba a las organizaciones de ayuda del mañana. Podemos confiar en que la comunidad internacional no tarde en hacer de la cuestión de las minas una máxima prioridad y allegue los fondos necesarios para llevar a cabo las actividades humanitarias esenciales. La asistencia quirúrgica de emergencia y la subsiguiente rehabilitación de las víctimas, así como las operaciones de limpieza de minas y la educación de las gentes acerca de los peligros de esas armas, quedan de hecho como las únicas posibilidades para aliviar los sufrimientos de centenares de miles de personas. Incluso para un curtido cirujano de guerra, la visión del cuerpo de un niño hecho pedazos es sobrecogedora e inquietante. Tales matanzas nada tienen que ver con la estrategia militar. Se trata de una decisión deliberada para infligir unos dolores y unas mutilaciones monstruosos. Es un crimen de lesa humanidad.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

HIDDEN KILLERS: THE GLOBAL PROBLEM WITH UNCLEARED LANDMINES: A REPORT ON INTERNATIONAL DEMINING. Sección de asuntos político-militares de operaciones de seguridad internacional. Departamento de Estado de EE.UU.,1993.

LANDMINES: A DEADLY LEGACY. Proyecto Arms de vigilancia de los derechos humanos y físicos a favor de los derechos humanos. Vigilancia de los derechos humanos, 1993.

SOCIAL CONSEQUENCES OF WIDESPREAD USE OF LANDMINES. Jody Williams en *Informe ICRC del Simposio sobre Minas Contrapersonal*. ICRC, Ginebra, 1993.

TEN MILLIONS TRAGEDIES, ONE STEP AT A TIME. Jim Wurst en el *Bulletin of the Atomic Scientists*, vol. 49, págs. 14-21; julio-agosto 1993.

Los geles, líquidos que no fluyen

Se forman geles cuando se entrelazan ciertas moléculas en disolución y tejen una red que atrapa al disolvente. La teoría de la percolación describe por qué "prenden" los geles

Madeleine Djabourov y Jean-Michel Guenet

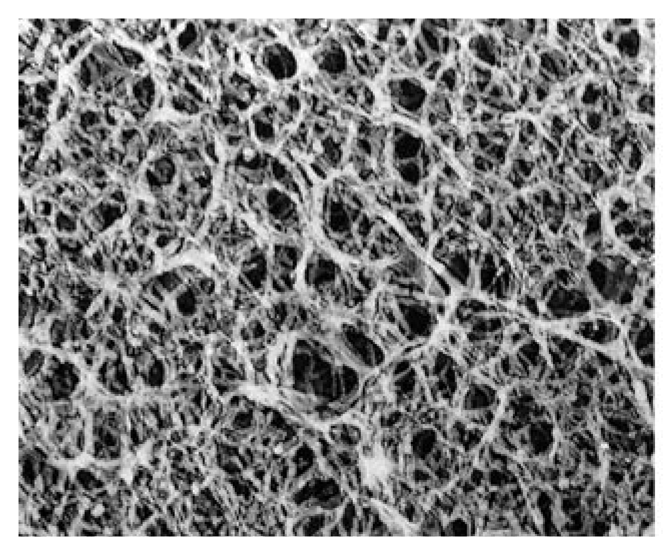
Las empresas de cosméticos producen geles para el cabello, transparentes y pegajosos, y geles cremosos, suaves al tacto; los cocineros preparan confituras o jaleas; las empresas agroalimentarias venden leches gelificadas, yogures por ejemplo; los pintores recubren las paredes con pinturas-gel que se extienden fácilmente y que no gotean; en farmacia, ciertos geles sirven de soporte a las moléculas activas, retardando la difusión de los principios activos en el organismo.

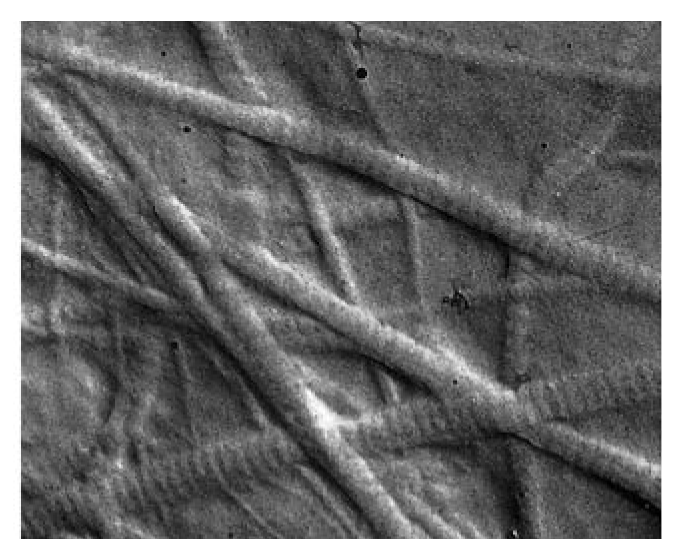
Los geles parecen estar ya por todas partes, y aún no hemos acabado de imaginar nuevas aplicaciones. Los especialistas en química física investigan ciertos geles "activos", que se deforman por la acción de campos eléctricos y que, un día, podrían reemplazar los sistemas biológicos gastados, por ejemplo para componer músculos artificiales.

Si las aplicaciones de los geles se multiplican, es porque hoy se comprende mejor el estado gel, así como las condiciones para su formación. Se han sintetizado nuevos geles y han salido a la luz propiedades comunes a todos los geles o, por lo menos, a un gran número de ellos, no obstante sus diferentes composiciones moleculares.

¿Qué es un gel? El término viene del griego *kolla*, "cola": los geles conocidos en la antigüedad (engrudo de almidón, confitura o jalea de gelatina) son a menudo pegajosos. La primera definición científica de los geles data de 1861, cuando el químico británico Thomas Graham describió los materiales que, en su época, parecían compartir ciertas propiedades: el almidón, las gomas vegetales, la gelatina, la alúmina hidratada y otras substancias minerales cuyas disoluciones se espesaban y "prendían".

La definición moderna de los geles incluye estos mismos materiales, junto con muchos otros que se han sintetizado en los últimos decenios, pero es más precisa porque se funda en la estructura microscópica y en las propiedades mecánicas (la "consistencia") de estos medios. Los geles constan de, al menos, dos componentes: el "disolvente", muy mayoritario, es un líquido; está atrapado en una pequeña cantidad de un segundo compuesto, que forma una red tridimensional en el seno del disolvente. La red impide que el disolvente fluya, por lo que un gel se comporta como un sólido blando, fácil de deformar, elástico o plástico. Por ser muy finas las mallas de la red, dejan que la luz los atraviese (los geles son a menudo transparentes) y retienen el disolvente, incluso cuando se comprime el gel (hasta cierto límite).





1. EN ESTOS DOS GELES fotografiados en el microscopio electrónico, las redes formadas respectivamente por moléculas de gelatina y por fibras de colágeno retienen el agua. Aunque la gelatina se obtenga por disociación de fibras de colágeno, los dos geles son materiales muy diferentes. Tienen en común una red de polímero que retiene a un disolvente.

El nacimiento de un gel

¿Cómo se fabrica un gel? Varios tipos de moléculas, orgánicas o minerales, crean una malla fina que retiene un líquido. Estas moléculas pueden ser muy pequeñas, compuestas de sólo algunos átomos; o bien moléculas gigantes, compuestas por el encadenamiento de miles de unidades idénticas o no (los monómeros), de una decena de átomos cada uno; otras veces, en cambio, los geles se forman a partir de dispersiones de partículas minerales (óxidos metálicos hidratados, arcillas, etcétera) que adquieren configuraciones en esfera, de bastoncito o de plaquita.

Los geles se forman cuando se provoca la agregación de estas partículas, que quedan rodeadas de disolvente. A lo largo de esta "transición sol-gel" (el "sol" es la disolución que tiene aún sus partículas dispersas e independientes), la disolución pierde su fluidez y se transforma en un sólido blando: gelifica. Los mecanismos que tienen lugar en el momento en que se produce el gel se reducen a dos tipos fundamentales: físicos y químicos.

Los geles químicos deben su estructura a una reacción química: el establecimiento de enlaces permanentes ("covalentes") entre los polímeros en solución engendra cadenas flexibles ligadas por sus extremos a otras tres o cuatro, lo cual crea la red extendida a toda la disolución. Estos geles químicos, que son irreversibles, pueden deformarse notablemente bajo la acción de una fuerza exterior débil y vuelven a recuperar su forma inicial cuando se suprime la fuerza.

Estos geles absorben una cantidad considerable de líquido y se hinchan de un modo espectacular: los geles superabsorbentes utilizados en los pañales, por ejemplo, son unos polvos compuestos de polímero dotado de carga eléctrica; en presencia de agua su peso puede llegar a ser ¡hasta 1000 veces superior a su peso seco!

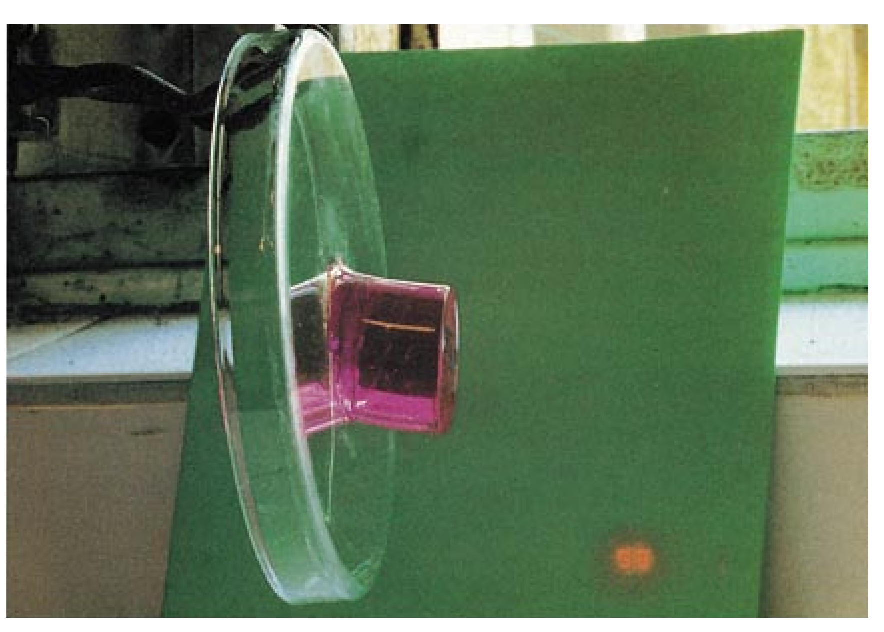
Este hinchamiento es selectivo, pues depende de la naturaleza del líquido en donde se sumerja el gel; así, los geles superabsorbentes no se hinchan o se hinchan poco en agua salada. La elasticidad de estos geles, así como su hinchamiento, se debe a la conformación en ovillo de sus cadenas: al hincharse, estos ovillos se desenrollan y ocupan volúmenes considerables, donde el líquido queda retenido.

La adherencia de los geles sobre las superficies sólidas, propiedad que les ha valido su nombre, está ligada a su elasticidad: cuanto más fácilmente se deforma el gel, más se adhiere. Por ser blando el gel, su superficie casa bien con la de la pared con la cual está en contacto: la superficie de contacto gel-sólido puede llegar a ser igual a la superficie del sólido. Las fuerzas de Van der Waals se ejercen sobre toda la interfase y aseguran el anclaje. Bajo el efecto de la gravedad o de una fuerza de tracción, las cadenas de polímeros se estiran y se desenroscan adquiriendo otra configuración, a su vez estable. El gel se deforma, pero no fluye.

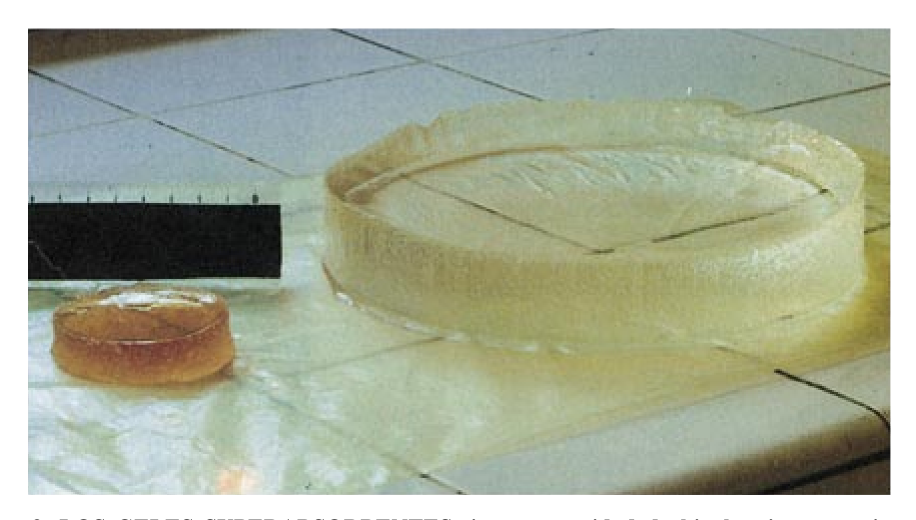
Por otra parte, en los geles físicos, la agregación de las partículas o de las moléculas es reversible: basta una variación de temperatura de sólo unos grados, a veces, para que el gel prenda o empiece a fundir. Veremos más adelante cómo el gel de gelatina, prototipo de los geles físicos, ilustra el mecanismo de la gelificación.

Los geles de biopolímeros

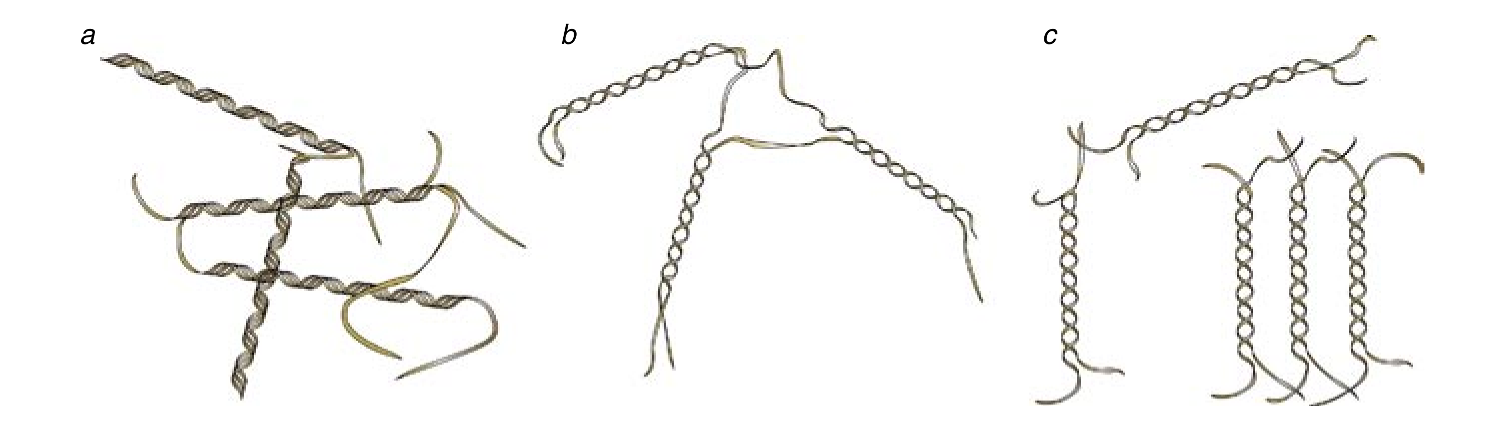
Inicialmente, los especialistas en geles estudiaron primero los geles físicos que estaban formados por biopolímeros. Estas macromoléculas naturales se distinguen de los polímeros de síntesis en que las subunidades encadenadas son químicamente diferentes: así, mientras el polietileno



2. LOS GELES son materiales pegajosos, porque contienen una red compuesta por largas cadenas de polímeros. Se deforman pero no fluyen, porque la red de polímeros que retiene el disolvente se extiende por toda la masa del gel.



3. LOS GELES SUPERABSORBENTES tienen capacidad de hinchamiento considerable. El disco de la derecha representa el gel obtenido a partir del gel de la izquierda, después de unas diez horas en agua (en agua salada, el hinchamiento es muy inferior). Este tipo de gel se utiliza en los pañales.



(polímero sintético) se genera con el encadenamiento de moléculas de etileno, las proteínas naturales, por ejemplo, tienen cadenas compuestas por el encadenado de diversos aminoácidos, de los cuales existen 20 tipos naturales.

Los geles de biopolímeros fueron los primeros geles conocidos: principalmente son geles de polisacáridos (azúcares complejos) o de proteínas en medios acuosos.

Las confituras, por ejemplo, son geles de pectinas, grandes biopolímeros extraídos de las membranas de las células de las frutas. De igual modo, los "aspics" son geles de una proteína gelificante, la gelatina, que se extrae de los huesos o de la piel de los animales. Disueltos en el agua, los biopolímeros gelifican en condiciones varias.

Estas moléculas deben sus propiedades gelificantes a sus posibilidades de asociación. Los carragenatos extraídos de las algas rojas gelifican cuando la disolución se enfría, formando dobles hélices entre las cadenas, algunas veces con la constitución de haces de dobles hélices; los alginatos, extraídos de las algas pardas, crean, con los iones calcio (Ca^{2+}), geles cuya estructura se parece a las cajas de huevos, y que aprisionan los iones calcio; las pectinas forman geles estableciendo enlaces por puentes de hidrógeno entre un átomo de una cadena y un átomo de hidrógeno de una cadena vecina. Los geles de gelatina surgen con el enrollamiento parcial de las moléculas en triples hélices, y los geles de las proteínas globulares tienen estructuras muy desordenadas, que se pueden asimilar localmente a racimos de uva. Por último, ciertas proteínas, como el colágeno (cuya degradación engendra la gelatina), forman fibras que, a su vez, pueden encadenarse para dar geles.

MADELEINE DJABOUROV y JEAN-MICHEL GUENET han llegado al estudio de los geles desde el campo de la física. Djabourov enseña física de la materia condensada en la Escuela de Física y Química de París. Guenet, director de investigación en la Universidad de Estrasburgo, ha recibido el premio Dillon de la Sociedad Norteamericana de Física.

Estructuración de los geles físicos

La proliferación de nuevos geles se debe principalmente a los avances en química de los polímeros. A medida que se sintetizan nuevas moléculas o que se modifican los polímeros naturales, por vía química o por ingeniería genética, se descubren nuevos sistemas capaces de gelificar. ¿Qué nuevos materiales podrán crearse con estas nuevas moléculas? Se estudia esta cuestión intentando comprender los mecanismos finos de la gelificación.

Los físicos conocen la existencia de geles termorreversibles cuya gelificación resulta de una cristalización clásica. Hace poco han descubierto una nueva clase de geles termorreversibles, la de los polímeros sintéticos, cuya gelificación está inducida por el disolvente. Examinemos esta última clase, en que los mecanismos de formación de geles se diferencian de un proceso de cristalización.

Los polímeros de síntesis tienden a imaginarse como filamentos, pero estos últimos no son regulares: tienen una microestructura determinada por la fórmula química de los monómeros y por su "tacticidad", es decir, por el modo en que están ligados los monómeros.

Se presenta esta tacticidad cuando los monómeros contienen un átomo de carbono asimétrico, es decir, ligado a cuatro grupos químicos diferentes. Así, el poliestireno, cuyo monómero es $[–CH_2–CH(C_6H_5)–]$, posee tacticidad, porque uno de sus átomos de carbono se halla ligado a un grupo $–CH_2$, a un átomo de hidrógeno, a un grupo fenilo $–C_6H_5$ y al resto de la cadena.

Para definir la tacticidad de una cadena de polímeros, estirémosla mentalmente, de manera que el esqueleto carbonado adopte una configuración en zigzag en un plano. Según su encadenamiento, los grupos laterales están, sea a un lado (isotacticidad), sea alternados de forma regular (sindiotacticidad), sea alternados de forma aleatoria (heterotacticidad).

La tacticidad determina la estructura del material obtenido a partir del polímero puro, sólido: debido a las interacciones de sus grupos laterales, los polímeros sindiotácticos son estables en la configuración de zigzag plana, mientras que los polímeros isotácticos serán inestables en esta configuración y preferirán adoptar una conformación en hélice.

A baja temperatura, los polímeros heterotácticos son amorfos, mientras que los polímeros isotácticos o sindiotácticos son cristalinos: las cadenas se repliegan de manera regular para crear laminillas de una decena de nanómetros de espesor; según la velocidad de cristalización, los pliegues serán más o menos regulares. Las laminillas, a su vez, desarrollan "esferolitos" visibles al microscopio.

En ciertos disolventes se observa esta estructura esferolítica, que se da en soluciones concentradas. En solución diluida, el polímero forma monocristales, laminillas aisladas. Por el contrario, existen disolventes en los que el polímero no desarrolla esfero-

4. ALGUNAS ESTRUCTURAS de geles de biopolímeros: de izquierda a derecha, se han representado los geles formados por la gelatina (*a*); por los carragenatos (polisacáridos extraídos de las algas (*b*); por los carragenatos kappa a los cuales se ha añadido iones potasio (*c*); por las proteínas parcialmente desnaturalizadas (*d*); por pectinas débilmente metoxiladas en medio ácido (*e*), y por las pectinas débilmente metoxiladas en presencia de calcio (*f*).

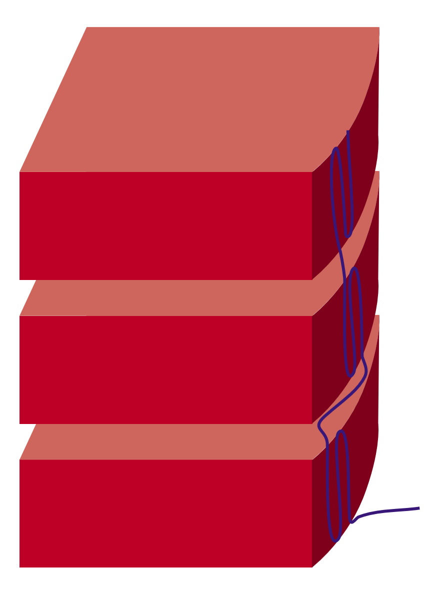
litos: macroscópicamente, el material es un gel, por lo común transparente, que resulta de una asociación de los polímeros en red aleatoria de estructura fibrilar. En solución diluida el polímero engendra agregados fibrilares, pero no laminillas.

¿Por qué los polímeros forman geles con ciertos disolventes, y esferolitos con otros? Estudios llevados a cabo en sistemas tan diferentes entre sí como los polímeros sintéticos y los biopolímeros muestran que las soluciones de polímeros gelifican cuando las macromoléculas son cadenas rígidas, que no puedan doblarse. Así, el poliestireno isotáctico puede presentar varios estados. A elevada temperatura, en el disolvente llamado cis-decalina, forma cristales laminares, cuyo tamaño es el mismo que los cristales del estado sólido, y el gel sólo aparece a baja temperatura. La agarosa, en cambio, es un polímero naturalmente rígido, que no puede crear esferolitos rígidos, y que gelifica bien bajo la forma de fibrillas.

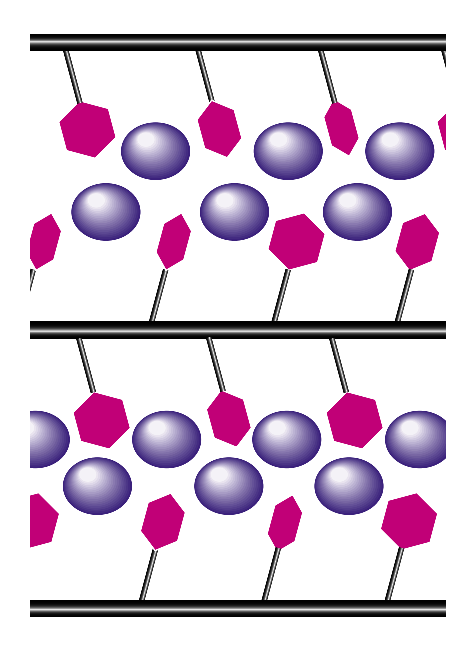
¿Por qué las cadenas de poliestireno isotáctico son a veces rígidas? ¿Qué fenómeno confiere rigidez a las cadenas hasta impedir que se doblen? Durante mucho tiempo se supuso que el disolvente y el polímero habrían constituido dos fases, una de disolvente puro, sin polímero, y otra de polímero concentrado, en estado líquido, que habría engendrado un sólido compuesto del polímero. Un mecanismo de este tipo habría creado una estructura de red estirando las cadenas. En todo caso, en esta hipótesis, la gelificación no se produciría más que en los malos disolventes, lo que no está de acuerdo con las observaciones experimentales: por ejemplo, se obtienen magníficos geles de poliestireno sindiotáctico en benceno, que es un buen disolvente de este polímero. Manifiestamente la rigidez de las cadenas no proviene de una separación de fase del tipo líquido-líquido que se desarrollara según un mecanismo de descomposición espinoidal.

Por otra parte, uno de nosotros (Guenet) ha demostrado que, a diferencia de la cristalización clásica, mecanismo en el que las cadenas se extienden, y después se doblan en el momento de su deposición sobre las caras de crecimiento de los cristales nacientes, las cadenas de los sistemas que gelifican poseen ya su conformación rígida antes que el sistema gelifique. Se conserva también la conformación rígida en el momento de la fusión del gel, al revés de lo que pasa en la fusión de los cristales poliméricos laminares.

La microestructura de los polímeros ilustra el mecanismo de su gelificación. Por ejemplo, el poliestireno isotáctico no forma los mismos geles en cis-decalina que en trans-decalina; ambos disolventes responden a la misma fórmula química, pero no ofrecen la misma conformación: el primero tiene forma de silla y el otro de bote. Debido a ello, puede estabilizarse el polímero en configuración helicoidal por uno u otro disolvente, que desempeña el papel de matriz alojándose dentro de las cavidades creadas por los grupos fenilo superpuestos. Las dos formas de decalina poseen una medida apropiada para alojarse en las cavidades, si bien conducen a estructuras diferentes, caracterizadas por temperaturas de fusión distintas.



5. LOS POLIMEROS (*azul*) cristalizan cuando pueden plegarse sobre las laminillas cristalinas en crecimiento (*rojo*). Forman entonces esferulitas, grandes granos visibles a la luz polarizada.



6. LA ESTRUCTURA de los geles depende de la distribución de las moléculas de disolvente entre las cadenas del polímero que forma una red en el seno de los geles: el disolvente estabiliza ciertas configuraciones del polímero.

A baja temperatura, todas las cavidades están en promedio ocupadas —y la cadena es rígida—, mientras que a alta temperatura ciertas cavidades se hallan libres, y de ahí la posibilidad de doblarse. Este mecanismo de estabilización-rigidez permite entender la transición sutil que se produce a temperaturas superiores a la temperatura de gelificación, cuando el sistema, aun conservando un orden molecular próximo al estado de gel, adopta una morfología diferente.

El estudio de la gelificación del poliestireno sindiotáctico confirma el papel de la microestructura del polímero: este polímero no forma gel con la decalina (cis o trans), pero sí gelifica en benceno o en tolueno. Resulta fácil entenderlo: si el poliestireno sindiotáctico adopta una configuración de zigzag planar, la cavidad entre los grupos fenilo es menor; para estabilizar el zigzag planar, hacen falta disolventes más pequeños, lo que ocurre con el benceno o el tolueno. En fin, se cree hoy que los geles de polímeros de síntesis considerados aquí se producen porque el mecanismo de doblado de las macromoléculas está bloqueado.

La transición sol-gel

Hasta ahora hemos descrito algunos mecanismos de formación de geles, mostrando que la sutil disposición de las moléculas de disolvente y de polímero es responsable de organizaciones variadas. Tomemos ahora un punto de vista opuesto y mostremos que diversos medios diferentes por su composición química tienen una característica común, su transición sol-gel.

Durante largo tiempo los físicos se han esforzado por comprender cómo se producen los cambios de fase en los cuerpos puros, que pasan reversiblemente del estado gaseoso al estado líquido, y después al estado sólido, a unas temperaturas y a unas presiones bien definidas. Estas transformaciones de condensación, de ebullición, de solidificación, de fusión o de sublimación son hoy mejor conocidas: se han identificado las propiedades características de estos distintos estados de la materia (capacidad calorífica, densidad, etc.) y se han establecido las relaciones entre estas magnitudes a lo largo de los cambios de estado. Después se ha demostrado que las leyes deducidas se verificaban en todos los cuerpos puros.

La transformación que hace pasar del estado de disolución líquida al estado gel, ¿obedece acaso a unas leyes que tienen validez cualesquiera que sean los compuestos utilizados como disolvente o como polímero gelificante? Lo que se busca son leyes capaces de describir tanto los geles permanentes como los geles reversibles con la temperatura: por tanto, la temperatura no podía ser un parámetro común a todos los geles. Por otra parte, las leyes buscadas debían tener en cuenta la estructura común a todos los geles: aun cuando las moléculas de polímero se unan para formar la red, ésta no es regular a grandes distancias, como la de un cristal; aunque es de consistencia sólida, el gel está desordenado. Por último, las leyes debían describir la velocidad de gelificación: la fluidez del medio cambia en unos instantes, o con un cambio ínfimo del número de moléculas que han reaccionado químicamente en la solución.

Estas últimas características han hecho pensar en comportamientos "críticos", en el sentido que los físicos dan a la transformación líquido-vapor cerca del punto crítico de un cuerpo puro: cuando la temperatura y la presión tienen unos valores llamados críticos, el gas y el líquido se confunden. Dentro de esta hipótesis, Pierre-Gilles de Gennes y Dietrich Stauffer, de la Universidad de Colonia, han establecido una analogía entre la gelificación y la teoría de la percolación, inventada en 1957 por el matemático inglés J. M. Hammersley.

Esta teoría describía inicialmente el paso de un fluido a través de una red de conductos repartidos al azar y algunos de los cuales están bloqueados (la palabra percolación viene del latín

7. LAS PROPIEDADES GELIFICANTES de los polímeros dependen de su "tacticidad". En esta figura se ha representado el poliestireno, cuyos átomos de carbono del esqueleto llevan alternativamente átomos de hidrógeno (*amarillo*) o grupos fenilo —C_6H_5 (*rojo*). Algunas cadenas que presentan esta composición química, cuando se estiran, tienen todos los grupos fenilo del mismo lado: son las moléculas isotácticas (*arriba*). Otras, las sindiotácticas, tienen los grupos fenilo alternativamente a los dos lados (*centro*); por fin, las heterotácticas ofrecen un reparto aleatorio de los grupos fenilo (*abajo*).

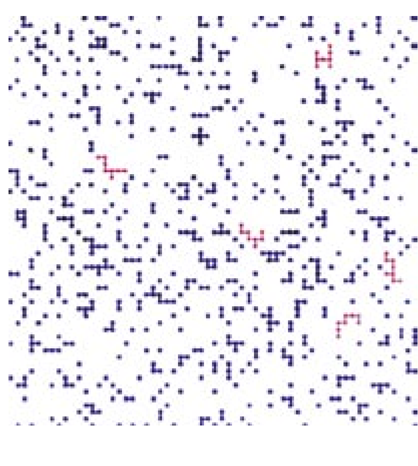
percolare, “filtrar”). Los dos físicos han generalizado esta teoría, con el objeto de describir los efectos vinculados al aumento de conexiones en el interior de un medio desordenado. El modelo prevé una transición brusca en el momento en que el grado de conexión entre los objetos pasa por el umbral de percolación.

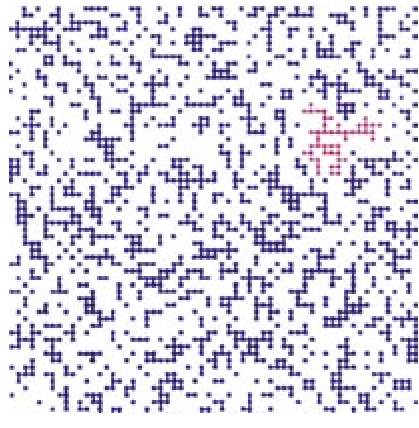
La percolación es fácil de simular con un ordenador: imaginemos un plano sobre el que trazamos una red regular cuyos trazos forman una cuadrícula. Cada nudo de la red es un emplazamiento. La regla de simulación es la siguiente: para cada emplazamiento se decide aleatoriamente si se establece un enlace con un vecino. Para una baja proporción de enlaces, los agregados son bastante pequeños, pero cuando un número creciente de emplazamientos interaccionan, los agregados son cada vez mayores.

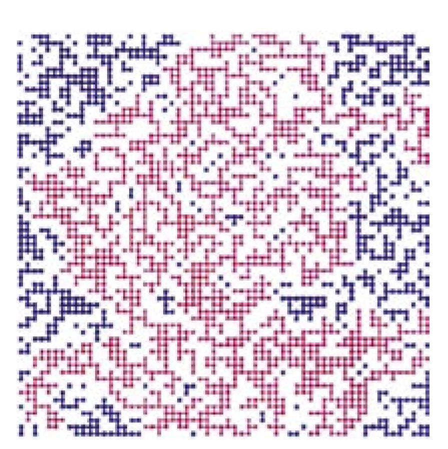
Aparece, por último, un agregado tan grande como la medida de la cuadrícula, que une los cuatro bordes de la red: es el límite de la percolación. Se describe la aparición de este agregado mediante una ecuación que relaciona la talla media de los agregados antes del umbral de percolación con la diferencia entre la proporción de enlaces establecidos y la proporción de enlaces que corresponde al umbral de percolación (una ecuación del mismo tipo describe la proporción de enlaces que pertenecen al agregado mayor, pasado el umbral de percolación).

La analogía entre estas simulaciones y un fenómeno de gelificación se expresa así: una disolución de polímeros enredados o de moléculas reactivas que se desplazan por agitación térmica puede asimilarse a un medio desordenado. Los reactantes químicos presentes o el enfriamiento del medio provocan reacciones locales aleatorias. Se forman así agregados de tamaño creciente que permanecen dispersos en el seno del disolvente. En un momento dado, se forma el agregado de percolación, y la solución adquiere las propiedades de un sólido: cuando se vierte la solución, ésta cae en bloque o bien queda pegada a las paredes del recipiente, ya que ha perdido su fluidez. Se traspasa entonces el punto de gel; éste corresponde al umbral de percolación en las simulaciones.

Las consecuencias de esta transformación sobre las propiedades de flujo son espectaculares. Las teorías permiten calcular los cambios de viscosidad: ésta, que es débil al principio (en razón de la propia concentración en soluto), aumenta cuando los agregados se hacen mayores. También puede calcularse la elasticidad del medio después del punto de gel. De hecho, estos dos parámetros tendrían un comportamiento crítico cerca de las condiciones de gel: añadiendo algunos enlaces más entre las moléculas, cambian bruscamente las propiedades de flujo. ¿Depende, pues, el aumento de la viscosidad y de la elasticidad tan sólo del grado de separación al punto de gel?







8. LA TEORIA de la percolación describe el proceso de constitución de un gel: el gel se forma cuando el polímero se organiza en una red (*en rojo*) que se extiende de un extremo al otro del disolvente (*abajo*).

¿Dónde acaba la analogía entre los diversos geles? Los teóricos prevén que estos comportamientos universales se verifican de una parte y de otra del umbral, pero tan sólo en la vecindad de la transición del umbral. ¿Cómo verificar experimentalmente estas ideas sobre los sistemas reales y no sólo sobre simulaciones? Si la gelificación es crítica, las dificultades experimentales para verificar las previsiones teóricas no son pocas: es necesario hacer dos tipos de experimentos. Por un lado, medir la elasticidad y la viscosidad de las disoluciones; por otro, controlar independientemente la cantidad de enlaces que se han establecido a lo largo de la transformación.

El gel de gelatina

Sigamos este proceso para un gel bien conocido: el que forma la gelatina. En este caso la gelificación se debe a la formación de uniones en triples hélices que religan localmente las cadenas. A suficiente concentración, el gel se crea progresivamente, cuando la temperatura se hace inferior a 36 grados.

Hemos medido la proporción de hélices que se forman a lo largo del tiempo, a diferentes temperaturas, gracias a medidas ópticas (modificación de la polarización de la luz que atraviesa la solución): el aumento del número de hélices es tanto más rápido cuanto más baja sea la temperatura. Por otra parte hemos medido la viscosidad y la elasticidad de las soluciones para las mismas temperaturas en función del tiempo: estas medidas son delicadas, ya que es preciso no perturbar la transformación al intentar ver si la solución fluye. Para hacer medidas como éstas, hay que aplicar fuerzas mínimas que permitan cuantificar deformaciones muy pequeñas.

Para todas las temperaturas medidas, la elasticidad depende tan sólo de la proporción de hélices; basta un pequeño porcentaje de monómeros cuya conformación pase de ovillo a hélice para transformar el líquido en gel. Además, la evolución de la elasticidad en las cercanías del umbral de percolación sigue las leyes teóricas de los modelos de percolación. Otros experimentos con geles físicos o químicos han mostrado que el modelo de percolación es aplicable.

Seguir la formación de los geles sin perturbarla continúa siendo una de las dificultades de estos estudios.

Este problema no reviste particular dificultad en el caso de los geles físicos, en los cuales las uniones pueden deshacerse por la acción de fuerzas mecánicas débiles. Según hemos descrito, el líquido está retenido en las mallas de la red por un efecto comparable a la capilaridad. Sin embargo, las moléculas de líquido son muy pequeñas (unas mil veces menores que la malla de la red), y siguen siendo capaces de desplazarse por todo el interior, como los pequeños iones disueltos. Por contra, la red atrapa las partículas mayores que los poros.

Se utiliza esta propiedad para mostrar la formación de la red. Uno de nosotros (Djabourov) realizó el siguiente experimento: se mezclaron bolitas de látex en una solución de gelatina, y se siguió por medios ópticos el desplazamiento de estas bolitas. El diámetro de las bolitas, del orden de 100 nanómetros, era muy superior al diámetro de los poros, que era tan sólo de cinco nanómetros, para la concentración de gelatina utilizada.

9. PRODUCCION INDUSTRIAL de gelatina alimentaria. La gelatina se extrae de huesos y de pieles de bovino o bien de huesos de cerdo macerados, en frío, en agua ligeramente acidulada o básica (con lechada de cal, en este último caso). Las materias primas se calientan entonces suavemente, para no degradar las moléculas de gelatina; después se colocan en un segundo caldo, más caliente, mientras se recupera la gelatina del primer caldo: a través de caldos sucesivos, se extrae así toda la gelatina, obteniéndose productos cada vez más degradados. Los caldos se concentran al vacío y después pasan por sistemas refrigerantes, que provocan la gelificación. El gel se extrude en forma de fideos que se trinchan y se sitúan sobre una cinta transportadora (son las operaciones mostradas en la foto, tomada en la fábrica de la compañía *SBI*, en l'Isle-sur-Sorgue), que los conduce a un túnel de secado: allí se secan con una corriente de aire deshidratado, en frío. Se obtiene entonces un polvo, que después se acondiciona. La gelatina así preparada conserva sus propiedades gelificantes: si se vuelve a poner en agua caliente, se disuelve y después provoca la gelificación del agua cuando su temperatura cae por debajo de los 36 grados.

En la solución aún no gelificada, las bolitas tienen un movimiento desordenado ("browniano"), como un borracho que ha perdido la idea de su destino. En este caso, el cuadrado de la distancia recorrida a partir de un origen cualquiera es proporcional al tiempo (y no la propia distancia, como en los movimientos clásicos, orientados), y el coeficiente de proporcionalidad es el coeficiente de difusión o difusividad. Sin embargo, la difusión de las bolitas en las soluciones no gelificadas es rápida a escala de tiempos largos y a escala de tiempos cortos. En los tiempos largos, la difusión resulta inversamente proporcional a la viscosidad del medio (ley general de los movimientos brownianos en los líquidos).

Bolitas en una red

Cuando nos acercamos a la gelificación, la viscosidad aumenta y la difusión de las bolitas a escala de tiempos largos se enlentece progresivamente. En los tiempos cortos, no aparece ningún cambio: en cuanto la red se estructura, las bolitas de látex quedan atrapadas. A escala de tiempos cortos, la difusión local se acelera bruscamente (el movimiento de las bolitas puede incluso ser más rápido que en agua pura), sin que hubiera sufrido ningún cambio desde el principio. Se explica este fenómeno por el acoplamiento elástico cada vez más intenso entre la red y las bolitas: las cadenas de gelatina son absorbidas sobre la superficie de las bolitas y a la vez participan activamente en la formación de la red. Esta comunica entonces a las bolitas sus propios movimientos de fluctuación, que están caracterizados por tiempos cortos.

En tiempos largos las bolitas tienen cada vez mayores dificultades para escaparse de la red donde están atrapadas; la difusión, que ya no es browniana, constituye la característica de los medios con gran desorden estructural (recorrido sembrado de trampas). Este comportamiento, previsto por la teoría de percolación, se conocía con el nombre de fenómeno hipodifusivo de la difusión en medios porosos con estructura muy desordenada. La distancia recorrida por las bolitas al cabo de un tiempo prolongado no sobrepasa a su propio tamaño. Podría emplearse este método para seguir gelificaciones de otros medios frágiles y transparentes.

Los estudios sobre los geles continúan en diversos frentes: aparecen

nuevos geles, en especial geles que se forman al aumentar la temperatura, por ejemplo soluciones líquidas a temperatura ambiente y que gelifican a la temperatura del cuerpo humano, propiedad importante para las aplicaciones médicas.

Un campo de investigación de interés es el de la puesta a punto de nuevos tipos de geles, químicos y físicos, aplicando los conocimientos sobre los mecanismos de plegado para la síntesis de nuevos polímeros, en disolventes apropiados. Los métodos modernos de ingeniería genética se aplican a la creación de biopolímeros de secuencias controladas.

Otro campo industrialmente importante consiste en analizar las gelificaciones perturbadas por acciones mecánicas, en especial por los efectos derivados del movimiento y circulación de los fluidos. Es frecuente, en efecto, que la transición de gelificación no se produzca en reposo, sino en el transcurso del bombeo o de la agitación, al mismo tiempo que se enfría la solución. Todo ello desemboca en la convergencia entre el proceso de agregación de las moléculas y el de fragmentación de los agregados. Los primeros resultados, a escala de laboratorio, muestran que estos efectos están ligados a los tipos de perturbación mecánica aplicada: velocidad de agitación constante o potencia de agitación fijada. Entre un gel y otro, los efectos son diferentes: fluidificación o espesamiento. Se están desarrollando simulaciones numéricas para dar cuenta de estos efectos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ADV. POLYM. SCI., A. H. Clark y S. B. Ross-Murphy, vol. 83, pág. 57, 1987.

J. PHYS. M. Djabourov, J. Leblond y P. Papon, vol. 49, págs. 319-333, París 1988.

MACROMOLÉCULES. M. Klein, A. Brulet y J.-M. Guenet, vol. 23, página 540, 1990.

POLYM. INTERN. M. Djabourov, volumen 25, pág. 135, 1991.

THERMOVERSIBLE GELATION OF POLYMERS AND GIOPOLYMERS. Jean-Michel Guenet. Academic Press, 1992.

LES CAHIERS DE RHÉOLOGIE. W. de Carvalho y M. Djabourov, vol. 13, pág. 247, 1994.

COLLOID AND POLYMER SCIENCE. J.-M. Guenet *et al.*, vol. 272, pág. 36, 1994.

¿Qué debe enseñarse en el bachillerato?

La enseñanza de la física

Pierre-Gilles de Gennes, premio Nobel de física



Me he interesado por los polímeros; también por los cristales líquidos y los coloides. Ahora me preocupa sobremanera la educación. No me gusta nuestro sistema educativo francés, no me gustan ni los conductos por los que imparte formación ni sus criterios.

Los niños del siglo XIX pertenecían en su mayoría a una civilización agraria. Educados en contacto con la naturaleza, aprendían a trabajar con las manos, a observar, a desarrollar su sentido práctico. La escuela de Jules Ferry [estadista que a finales del siglo pasado implantó en Francia la enseñanza obligatoria] les aportaba un complemento abstracto, pero útil. Ahora, en las postrimerías del siglo XX, la mayoría de los niños viven en ciudades; han perdido el contacto con la naturaleza. La televisión reduce su capacidad de observación; no tienen oportunidad de trabajar con las manos. A pesar de lo cual, la escuela sigue siendo tan abstracta como en los tiempos de Ferry. Es necesario corregir el desequilibrio.

Los sistemas no formales de educación, los museos, la televisión educativa, etc., no palian tales insuficiencias, porque la visita a un museo, por ejemplo, más que comprensión, provoca sorpresa. Despierta la curiosidad, pero invita hacia otro tipo de trabajo, sin guía, autónomo. Yo no creo en la enseñanza por televisión; me parece incluso que la televisión educativa tiene efectos perniciosos: el espectador se halla en actitud pasiva, no se le hace buscar. La correcta comprensión del mundo exige una inversión por parte propia.

No hacen falta medios materiales para despertar el sentido de la observación, de lo concreto, de la investigación. En lugar de invertir el dinero en visitas a ciudades —¡otra vez ciudades!— podríamos dedicarlo a paseos naturalistas, a buscar fósiles, a recoger insectos o plantas.

Este primer problema va de la mano con el rechazo de la educación científica que manifiestan los jóvenes de 14 o 15 años. Se estima en Francia que tal rechazo débese, en parte, a que las ciencias, y sobre todo las matemáticas, sirven de criba selectiva. ¿Convendría suprimir los exámenes? No. Estoy firmemente a favor de ellos, incluso en los cursos de alumnos adolescentes. Me parece que hemos sido demasiado laxos y que el ejemplo de los países nórdicos es peligroso. Yo deseo que haya exámenes tanto de nuestro idioma, como de historia, de matemáticas o de física. Tales exámenes no han necesariamente de constituir la base de la selección, pero su necesidad se impone por múltiples razones; sobre todo, para que se tome en serio el trabajo realizado en clase: no podemos dar por válido una especie de folclore en el que todo el mundo aprueba, en el que todos son buenos y geniales. Si un dibujo no se ha hecho con cuidado, no debe exponerse al lado de los realizados con esmero. Los profesores y los alumnos han de tener libertad para organizarse, pero creo que los alumnos necesitan "luces de alarma" que les adviertan de sus insuficiencias. Vale lo dicho a todos los niveles, de la escuela elemental a la universidad.

¿Qué hay que enseñar? Un poderoso grupo de presión instalado en el Ministerio de Educación nacional opina que la escuela debe enseñar las técnicas modernas. El programa de física, en segundo (penúltimo curso del bachillerato), presenta los amplificadores operacionales, los altavoces y cierto número de aparatos similares. En mi opinión esto es catastrófico, porque se habla de joules y de watts sin saber qué es la energía, la fuerza o el trabajo: la carreta delante de los bueyes. Los amplificadores operacionales se enseñan con la finalidad de combatir el exceso de abstracción. ¡Qué visión tan estrecha del sentido práctico! Lo que hoy se propone confunde la técnica y la ciencia. No establezco jerarquización entre una y otra; ambas son por igual indispensables. Pero no se puede formar el espíritu científico enseñando tan sólo la técnica (la proposición contraria no es menos verdadera).

Resulta imperativo, por otra parte, hallar un justo término medio entre una enseñanza demasiado cualitativa y una enseñanza en exceso formal. Puedo impartir a los alumnos universitarios de tercer ciclo una lección de una hora sobre los polímeros de más frecuente uso, pero procuro no hacerlo: los estudiantes creerían, erróneamente, que en el examen no se les iba a preguntar sobre las propiedades cualitativas; escucharían sin interés, sin memorizar, sin percatarse de que más adelante, cuando lleguen a la industria de los polímeros, van a cometer graves errores si no saben distinguir los polímeros cristalizables de los no cristalizables; los que se pueden utilizar en la industria textil de los que no. En la práctica, intento ir alternando momentos de exposición

Desde el siglo pasado, no ha habido apenas gobierno en nuestra nación que no reformara el plan de estudios del precedente. Investigación y Ciencia *ha solicitado a reconocidos representantes de distintas disciplinas de Francia y España, que expongan qué les hubiera gustado recibir a ellos*

formal con intermedios de exposición cualitativa, con la intención de que se mantengan atentos. Me parece que el profesor de instituto debería seguir más o menos la misma táctica, aunque temo que se vea abrumado por las pruebas de selección, por los programas y por la preocupación de los padres, y que, por ello, sean los aspectos abstractos los que ocupen la mayor parte del tiempo. Me doy cuenta de que tales partes son las más sencillas de controlar, pero la acumulación de abstracciones resulta peligrosa.

Volvamos a la cuestión con ánimo positivo: ¿qué enseñar? Tengo sobre mi escritorio un pequeño sistema compuesto de dos placas paralelas de plexiglás, cerradas por los costados con cinta adhesiva, excepto en uno de los ángulos superiores. Los físicos, introduciendo entre ellas una mezcla de azúcar blanco y de azúcar rojo, observan avalanchas, ven producirse estratos de blanco y rojo y exploran una física desconocida. Este sistema, que cuesta menos de tres mil pesetas, resultaría excelente para una opción experimental a finales del bachillerato. Como es natural, no se les va a exigir a los alumnos de instituto que realicen un trabajo de investigación sobre tal sistema, pero sí podrían descubrir algunos hechos sencillos.

No será posible modificar el sistema existente sino actuando simultáneamente sobre varios grupos: los docentes, los funcionarios de Educación, los gabinetes técnicos de creación de programas, las asociaciones de padres de alumnos... Con frecuencia ocurre que uno de estos grupos está dispuesto a realizar cierta reforma, pero los demás no, y el proyecto fracasa. La sensibilización de los alumnos y de los padres es fundamental. En Francia, ciertos docentes han recibido con desconfianza la opción de ciencias experimentales, instalada en el penúltimo curso de bachillerato, pero son los padres quienes constituyen, a mi juicio, el obstáculo más tenaz al cambio: temen que sus hijos "pierdan el tiempo" con esta opción.

En nuestros días veo con alarma cómo la angustia se remonta hacia los más jóvenes, debido, tal vez, al aumento del paro. Se está cavando un abismo entre institutos pasivos y los centros que sólo piensan en preparar las pruebas de acceso a la universidad. Eso nada tiene de bueno.

La enseñanza de la química

Jean-Marie Lehn, premio Nobel de química

¿Se debe enseñar química en los colegios de secundaria y en los centros de bachillerato? ¡Pues claro! El mundo en que vivimos se compone de moléculas y de átomos. No cabe la menor esperanza de comprender el mundo si no se explora el mundo molecular; tal es el objeto de la química. ¿Será necesario anteponer esta disciplina a la enseñanza de las artes o las letras? Las artes expresan uno de los aspectos de la creatividad humana; las ciencias, otro. Ambas son, pues, indispensables; la cultura sin ciencia sería oscurantista, regresiva.

Las escuelas, los centros de secundaria o bachillerato tienen ante sí una elección difícil, porque el número de horas de enseñanza es limitado. Como es evidente, el arte estimula la creatividad, pero la creatividad científica no debe estimularse menos, pues se funda en la curiosidad natural de los niños. Si a un niño le damos un despertador, lo desmontará para tratar de comprender su funcionamiento. ¿Por qué no utilizar esta tendencia espontánea de nuestra especie para enseñar ciencias?

Lamento, en la misma línea, que los aparatos científicos desechados se arrojen a la basura. ¿Por qué no dárselos a las escuelas y colegios, para que los niños los desmonten? ¿Que encuentran un prisma? De él podrán servirse, con ayuda de su profesor, para explorar las leyes de Descartes o para reproducir las experimentos de Newton. ¿Que en ellos hay pilas? Las utilizarán para recuperar el dióxido de manganeso, partiendo del cual podrán preparar oxígeno. Responderemos así por duplicado a la pregunta "¿cómo funciona?": mostraremos la composición de los instrumentos y haremos que las manos vayan a la par que la cabeza.

¿Qué dosis de química se debe administrar? ¿Ha de tener la química el mismo rango que la física o las matemáticas? No quiero echar cuentas tan prolijas como discutibles, pero compruebo que a la química, en nuestros días, se le asigna una porción demasiado pequeña, habida cuenta de que interviene en lo esencial de las actividades humanas y de las industriales en particu-



lar: en la industria textil, en farmacia, en electrónica... Todo es química, pues todo es materia.

¿A partir de qué edad deben aprender química los niños? En lo que a mí respecta, no descubrí la química hasta lo que en España sería el COU, aunque al presentarles a los niños pequeños ciertas transformaciones moleculares pueden ofrecérseles sensaciones nuevas: al hacer reaccionar polvos de dos colores para obtener un tercero se opera una transformación intrínseca de la materia.

¿Qué se ha de exponer a estos jóvenes? El programa actual me parece aberrante, por su formalismo. Deberíamos comenzar por la práctica de la disciplina, presentar transformaciones espectaculares, perceptibles por los sentidos: cambios de color, de olor, de sabor. Después, sacando partido de la curiosidad espontánea de los alumnos, les presentaremos con más detalle los objetos químicos. Insistiremos en la química, ciencia arquitectónica: las moléculas son pequeñas construcciones que edificamos con piezas, como en los juegos de construcción.

¿Cuáles habrán de ser las moléculas de interés? ¿Nos limitaremos a la química inorgánica en las clases de los pequeños y reservaremos la química orgánica para cursos más elevados? Tal distinción se torna inútil al considerar la química desde la perspectiva de la construcción arquitectónica. La capacidad de los átomos de carbono para establecer cuatro enlaces con átomos vecinos hace de la química orgánica un campo susceptible de presentación sencilla. No descarto que se expliquen también las moléculas inorgánicas: no hay razón para dejar de evocar la sal de cocina u otras moléculas de nuestro ambiente; las que confieren su aroma a las naranjas o a las rosas; las que dan su sabor a las manzanas verdes. Tal vez tuvieran cabida incluso ciertas moléculas, como la aspirina, que permiten tender puentes entre varias disciplinas.

El enfoque arquitectónico tendría que ser completado con la presentación de las propiedades macroscópicas de esos objetos microscópicos que las moléculas son. La experiencia del agua de cal, que se enturbia cuando soplamos a su través, está repleta de enseñanzas: se requeriría un extraordinario acto de fe para creer que son las moléculas las causantes del enturbiamiento, pues, ¿qué se ve? En el mejor de los casos, si tenemos la paciencia de esperar a la sedimentación del precipitado, se recupera un polvillo blanco constituido, según nos revela el microscopio, por gránulos blancos. ¿Qué son estos gránulos y qué relación tienen con las moléculas de que nos hablan? El instructor, en la escuela, podría utilizar esta experiencia como tema central en torno al cual elaborar: se vería abocado a aludir a la solubilidad de los cuerpos (fenómeno que siempre suscita preguntas), podría hablar de gases como el dióxido de carbono, hablaría de la cal, regeneraría el dióxido de carbono atacando la cal con vinagre... Los niños no admitirán la noción de molécula más que acercándonos progresivamente a ella. Procederemos de forma inductiva, de lo grande a lo pequeño, reproduciendo experimentos de la historia de la química. No soy el único que piensa que las "lecciones de cosas" contenían en su espíritu gran parte de lo que conviene rehacer.

¿Qué papel habrá de ser el de los docentes? La enseñanza ha de renovarse empleando ordenadores y redes informáticas. Si se admite que los conocimientos se transmiten eficazmente a la manera platónica, por medio de preguntas que hacen decir al alumno lo que le queremos enseñar, se tiene un nuevo objetivo didáctico, que podría fundarse con provecho en la utilización de ordenadores, de sus bancos de informaciones y de su interactividad.

En definitiva, la enseñanza actual peca de aberrante por su formalismo, incluso en el caso de los últimos cursos de secundaria. Los hechos químicos no deben servir sólo para hacer ejercicios de matemáticas hasta provocar el aburrimiento. Los profesores de matemáticas pueden utilizar el formalismo químico, si lo creen conveniente, como ilustración de sus lecciones y los profesores de química pueden enseñar cómo se utiliza para formalizar un problema, vale decir, de hecho, para exponer el método científico. Pero en este estadio la traducción de la química a ecuaciones matemáticas tiene que ser cuestión secundaria.

Mucho es lo que hay que hacer para no centrarse en el formalismo: la comprensión de que la química revela coherencias de la naturaleza, regularidades, leyes, constituye un gran placer. Tomemos, por ejemplo, la función alcohol. Cada alcohol es particular, pero todos los alcoholes tienen algo en común, un comportamiento parecido. Y la química es ante todo creativa en su esencia, permitiendo transformar la materia dentro de su intimidad.

La enseñanza de la biología

Antonio García Bellido, premio Príncipe de Asturias

La biología ha dejado de ser una materia de cultura académica incluida en las ciencias naturales. El conocimiento de sus aspectos fundamentales es necesario para fundamentar nuestra actividad diaria, para entender entre muchas más cosas las causas de las enfermedades que nos afectan o las bases genéticas de nuestro comportamiento.

El joven de bachillerato debe adquirir, más que un conocimiento formal, criterios para analizar sucesos, situaciones u opiniones relacionados con los fenómenos biológicos. El cuerpo del conocimiento biológico es difícil de enseñar porque la biología asciende a través de muchos niveles de complejidad, desde las moléculas y las células hasta sistemas orgánicos como el cerebro o la ecología. Se extiende además en aspectos muy diversos, como el funcionamiento del corazón o la enorme variedad de especies del planeta. Estas dificultades se pueden paliar mejorando doblemente los métodos de enseñanza y la selección de temas modelo de entre su amplio contenido.

El método depende del profesor. El profesor debe ser primeramente entusiasta de lo que enseña. Debería empezar aislando el problema, definiendo por qué los objetivos de este conocer concreto son importantes. El alumno que lo ha entendido prestará mayor atención y participará en su propio aprendizaje. Los alumnos deben contribuir presen-



tando a sus compañeros temas que han preparado en su casa y que se discutirán en clase. El profesor debe ser más un guía que un repartidor de datos. El libro de texto puede ser letra muerta, si no se le acompaña de otras lecturas y en nuestro caso de extensas prácticas. Mi proposición puede ser difícil de llevar a cabo por falta de profesores adecuados o de medios, pero deberíamos intentarlo.

La biología debe descomponerse en temas, cada uno analizado a lo largo de todos los niveles de complejidad. Es en esta conexión explicativa donde está lo que se queda para siempre, el criterio a la hora de juzgar lo nuevo. Prácticamente en el análisis de cada tema, sea la infección bacteriana, el cáncer, la herencia de las tendencias criminales o la biodiversidad, quedan al descubierto aspectos básicos de toda la biología —pero relacionados entre sí de causa a efecto.

La biología tiene subdisciplinas instrumentales como la bioquímica, la genética y la anatomía, cuyos fundamentos deben impartirse a la vez que se exponen los problemas biológicos. Estos deben estar elegidos como paradigmas de las subdisciplinas conceptuales, biología celular/histología, fisiología, embriología, neurobiología, comportamiento y ecología, y de los grandes temas biológicos la evolución y la actividad de pensar. ¿Qué ejemplos se toman? Los que el profesor y los alumnos quieran.

En el bachillerato se definen las vocaciones y éstas hay que provocarlas. A un futuro ingeniero agrónomo le motivaría saber qué son y cómo se hacen las plantas transgénicas. Y el futuro médico debería saber que el cáncer lo causan genes normales que operan en el desarrollo pero que se han descontrolado por una mutación somática. En el bachillerato se hacen también los ciudadanos informados y responsables. El ingeniero de telecomunicaciones tiene que saber que el tomate transgénico que come no es una bomba que explota en cáncer. Cuando hablamos de la responsabilidad social del invertido sexual deberíamos saber hasta dónde su comportamiento está determinado por la herencia. Ciertamente no hay libros de texto enfocados así, pero el profesor, por algo lo es, debe preparar los temas y puede usar el libro de texto como de referencia, como tema.

Y el alumno tiene que estar motivado, por las lecturas que haga de los periódicos, las discusiones que tenga con los compañeros, las prácticas de laboratorio y su propia curiosidad por la razón de ser de las cosas o los fenómenos. El alumno tiene que pedir al profesor que le explique las maravillas que hay detrás de los fenómenos, del funcionamiento del cerebro en su propio pensar, de la evolución de los organismos o del comportamiento de los pájaros. Desde ahí a ser un hombre de provecho no hay mas que un paso.

La enseñanza de las matemáticas

Jean-Christophe Yoccoz, premiado con la medalla Fields

No le colguemos el sambenito: aunque se critica la enseñanza de las matemáticas en la escuela primaria, en la enseñanza secundaria y en el bachillerato, me propongo alzar una voz contraria: estoy, en lo esencial, satisfecho de la enseñanza que he recibido, porque globalmente estaba bien realizada, lo mismo en matemáticas que en las otras disciplinas. Fue seria y nada en ella era absurdo. Trataré de demostrar que ciertas limitaciones de la docencia impiden que la enseñanza de las matemáticas pueda diferir demasiado de la que fue ayer y de la que es en la actualidad.

Quienes critican la forma en que está organizada la enseñanza elemental y media suelen ser utópicos y subestiman el tiempo necesario para que los alumnos asimilen las nociones fundamentales. El caso de las proporciones y de los porcentajes resulta interesante a este respecto: para manipular esta noción, difícil aunque indispensable, se requiere tiempo. Una vez adquirido el dominio —operacional— de la proporcionalidad, se tiene la impresión de haber dedicado un tiempo excesivo a una cuestión de poca monta.

Pero existe gran diferencia entre conocimiento y maestría. Es lo que dice el proverbio chino: “Oigo, olvido; veo, recuerdo; hago, comprendo”. Se tarda más en hacer que en oír y en ver. El “saber hacer” sólo se adquiere al precio de repetidos repasos, impartidos a clases enteras y no a individuos. En un mundo ideal, utópico, se podría acelerar la enseñanza de estas nociones asignando un maestro a cada alumno; ello es imposible, y los profesores, sean de enseñanza básica o de instituto, tienen la difícil tarea de comunicar un saber operacional a clases enteras. En general, hacen su trabajo notablemente bien. Más en concreto, las matemáticas, elementales o no, son como la lengua: hay que balbucear y repetir la tabla de multiplicar para retenerla; no basta ver una sola vez la ortografía de una palabra para escribirla correctamente. Se trata de un hecho evidente, olvidado con frecuencia: la repetición es imperativa en la enseñanza, y esta necesidad le corta las alas a no pocas ideas audaces. Es necesario ser pragmático.

Repetición, sin duda, pero no repeticiones idénticas. Un ordenador que dijera siempre lo mismo a los alumnos no sería buen pedagogo. En ello consiste el arte del docente, tanto en la escuela como en la universidad: saber presentar muchas veces unas mismas nociones desde distintos ángulos. El álgebra lineal, por ejemplo, tiene un aroma que recuerda al de la proporcionalidad: cuanto antes se enseñe esta parte indispensable de las matemáticas más se facilita el trabajo en la universidad, porque la experiencia demuestra que son necesarios al menos cuatro o cinco años para que los estudiantes

dominen esa herramienta, básica para tantas otras cuestiones matemáticas.

¿Qué lugar han de ocupar las matemáticas en la enseñanza? Se trata de un debate muy actual. Se han alzado voces contra la posición “exagerada” que supuestamente se les ha otorgado y contra la esterilización de los espíritus que su formalismo puede haber provocado. Sin embargo, al igual que no podemos vivir sin aprender a hablar nuestro idioma, forzoso nos es aprender algo de matemáticas. Así decía Galileo: “La filosofía está escrita en este libro inmenso perpetuamente abierto ante nuestros ojos (me refiero al universo), pero no podemos comprenderlo si no aprendemos primero a conocer la lengua y los caracteres en los que está escrito. Está escrito en lengua matemática, y son sus caracteres triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin cuya intermediación es humanamente imposible comprender una sola palabra.” Recordemos también al padre Condillac: “No pensamos sino merced a las palabras. El arte de razonar se reduce al lenguaje bien construido.” Lo mismo que ellos, compruebo que la vida cotidiana nos asesta números y no siempre lo hace con honradez. Para vivir en mi ciudad he de estar familiarizado con las cifras, con los métodos para interpretarlas. Las matemáticas no son una ciencia formal reservada a una elite: a todo el mundo le conviene saber que dos aumentos consecutivos del diez por ciento no equivalen a un aumento del 20 por ciento.



Tras una reunión de la Comisión Faroux, de la que formo parte, un representante de la industria se extrañó de que muchos trabajadores no lleguen a comprender nociones de este tipo, elementales desde el punto de vista matemático. Y lo dicho para los números vale también para las figuras: es necesario enseñar la geometría elemental, porque es un útil para la vida cotidiana.

En el fondo, la crítica de la enseñanza de las matemáticas suele confundir dos aspectos: la definición de los programas y el papel de las matemáticas como instrumento de selección. Me parece que difícilmente se pueden recortar los programas, menos ambiciosos de lo que suélese decir (de hecho, los estudiantes de universidad acostumbran quejarse de la tremenda subida de nivel que han de conseguir); yo, por mi parte, protestaría enérgicamente contra una reducción del programa de matemáticas en la enseñanza secundaria. Los programas no me parecen demasiado cargados: si fueran menos ambiciosos correríamos el riesgo de que acabaran por ser un cascarón vacío.

A fin de cuentas, tras haber oído los informes presentados en el marco de la Comisión Faroux, tengo la impresión de que la escuela primaria no funciona tan mal, y considero peligroso perturbar la enseñanza que allí se imparte. El departamento de evaluación y prospectiva del Ministerio de Educación, valiosísimo instrumento de evaluación, ha indicado que la tasa de analfabetismo ronda el 15 por ciento en el nivel de ingreso en secundaria. Admito que es necesario esforzarse más, pero la cifra bruta no me merece confianza. Me doy cuenta de que los alumnos tienen un dominio insuficiente del lenguaje, de la geometría y del cálculo, pero tengo la impresión de que la escuela primaria funciona bien. Es en los centros de secundaria donde más se manifiesta la ruptura. Se trata de un problema social, no de un problema de la enseñanza, que exige respuestas específicas a problemas específicos. Encuentro temibles las panaceas pedagógicas y me gustaría, además, que dejásemos de buscarlas.

Tampoco en el primer ciclo universitario se podrán dar soluciones universales a los problemas. Uno, y muy serio, es la masificación: en Derecho, en ciertas aulas magnas se llegan a congregar 1000 alumnos. ¡Es una barbaridad! El problema no es tan agudo en ciencias; la masificación no es tanta. Me parece que hace falta encaminarse hacia un primer ciclo universitario cuya ruptura con el bachillerato sea menos drástica, en el que realmente sea posible realizar el seguimiento de los estudiantes y que ofrezca una pluridisciplinaridad auténtica.

Entrando ahora en el detalle de los programas, la comparación de lo que me fue enseñado y de lo que se está enseñando a mi hijo, que cursa primero de secundaria, me hace ver lo que yo quisiera que se introdujera y también lo que se tendría que evitar. Se ha eliminado la teoría de conjuntos, que me fue largamente explicada: eso está bien. Lamento, por el contrario, la desaparición del álgebra lineal, porque es indispensable. La geometría es fundamental, pues proporciona una representación del mundo en el espacio. No propongo una geometría demasiado refinada, ni una concatenación de teoremas finos, sino, sobre todo, manipulaciones prácticas. Y de nuevo un truismo que es obligado repetir: la competencia adquirida es más importante que el saber almacenado. Hay que dominar el plano, el espacio, etc., y disponer de algunas definiciones de base.

Es necesario tender puentes entre la geometría y los números. El puente arquetípico viene dado por las coordenadas cartesianas, pero también, por ejemplo, y es cosa que suele olvidarse, con la noción de medida de longitudes. En nuestros días, estas nociones se enseñan bastante pronto, lo que está bien. Más avanzada la enseñanza, se hará ver, asimismo, que los números complejos pueden considerarse a la vez como números y como puntos del plano.

He aludido ya al álgebra lineal; insisto en ella para señalar su carácter básico para el dominio del cálculo diferencial. Se comprende su importancia cuando se sabe que la formalización de los problemas de física se efectúa mediante funciones de varias variables: esta álgebra consiste en el cálculo con tales funciones. Por otra parte, dichas funciones se presentan bajo la forma de ecuaciones diferenciales y de ecuaciones en derivadas parciales, que con frecuencia resultan insolubles. El físico, en consecuencia, se ve no pocas veces obligado a reemplazar las funciones verdaderas por aproximaciones lineales.

¿Cómo deben enseñarse las matemáticas? No deben, desde luego, inclinarse hacia el exceso de formalismo. Los objetos matemáticos han de dotarse de aspectos

intuitivos que no siempre quedan plasmados en teoremas precisos. Considero, por una parte, que la imposición de cierto rigor lógico es formativa, pero también soy partidario de hacer matemáticas "con las manos". Los matemáticos, además, califican arbitrariamente de trivial lo que estiman que no hay necesidad de justificar. Esta "trivialidad" depende del nivel, de la edad matemática de los alumnos.

Recíprocamente, es preciso imponerse la obligación de dar a los alumnos una idea clara de en qué consiste una demostración. Las matemáticas no se deben reducir a demostraciones, por ser ello contrario a su dinámica cotidiana, a su práctica, pero el rigor, respaldado por la intuición, hace mucho para producir un útil intelectual potente. Esto que digo me parece verdadero incluso para la universidad: en mis cursos, sean de licenciatura o de doctorado, voy alternando las partes formales con otras de matemáticas "hechas con las manos", que proporcionan las ideas, y establezco una separación cuidadosa entre lo que ha sido demostrado y lo que está siendo sugerido. El arte de enseñar es el arte de bien dosificar; lo que es excesivo resulta ridículo.

Afrontemos ya el problema crucial: ¿cómo lograremos que los alumnos pongan interés? Señalemos para empezar que el mismo e idéntico problema se plantea en matemáticas y en letras, donde es necesario aprender y asimilar ciertas técnicas de conjugación. Puede parecer que en un nivel elemental la conjugación carece de interés; sin embargo, constituye una de las bases del manejo del lenguaje. De igual forma, las proporciones, a las que ya se aludió, forman parte del instrumental indispensable para llegar más adelante a matemáticas interesantes. Podemos, sin duda, enseñar matemáticas interesantes, pero hay que pagar su precio: no cabe escatimar la enseñanza de las técnicas. Como le dijo Arquímedes al rey de Siracusa: no hay calzada real. Yo no soy capaz de resolver el conflicto mejor que lo hacen los profesores de primaria o secundaria, quienes van alternando las partes técnicas y las partes interesantes, y lo hacen de un modo que por lo general no me aburría cuando yo iba a la escuela, y más tarde al colegio o al instituto.

Refirámonos, para concluir, al problema aludido de la selección mediante las matemáticas. Hay que señalar, de entrada, que la comunidad matemática tiene un punto de vista ambivalente. A los matemáticos les fastidia la cantinela, "¡Ah, es usted matemático! Pues, sabe, yo de matemáticas, nada." Por otra parte, dado que la comunidad matemática francesa se cuenta entre las mejores del mundo, señal es de que el sistema de detección y estímulo de talentos funciona muy bien. Ahora, tal resultado es fruto, sobre todo, de la selección de los alumnos mediante las matemáticas. A decir verdad, a mí no me molesta que se utilicen las matemáticas para la selección de los alumnos, pero admito de mal grado que ese criterio sea el único. Hace tiempo, la selección por el latín permitía compensar la selección por las matemáticas. En cierto sentido era preferible, porque con sólo las matemáticas no se reconoce más que un único tipo de talento. Harían falta varios instrumentos de medida.

La enseñanza de las lenguas clásicas

Francisco Rodríguez Adrados, presidente de la Sociedad Española de Estudios Clásicos

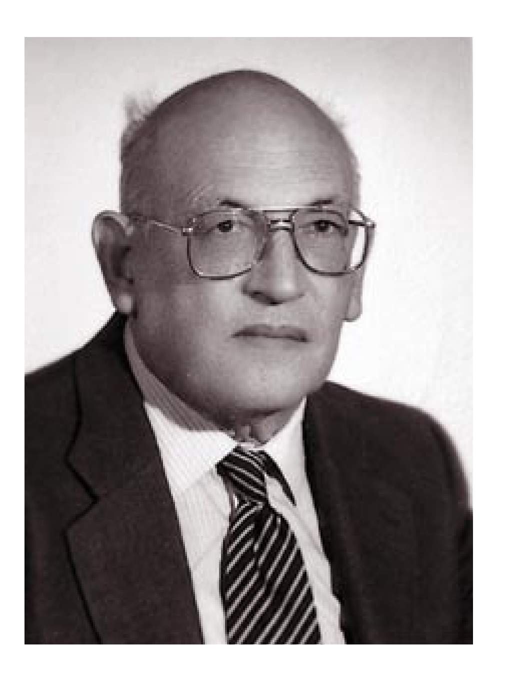
Las lenguas clásicas han sido el centro de formación intelectual durante muchos siglos. Y no sólo para los hombres de orientación humanista, también para los científicos: nombres como los de Newton, Linneo, Heisenberg u Oppenheimer son ilustrativos. No sólo introducían en el mundo y el vocabulario de la cultura (la lengua científica es un semigriego), sino que ejercitaban las capacidades intelectuales.

Aquí, en España, aparte de ser centrales las lenguas clásicas en "filosofía y letras", existía un latín para todos, en el bachillerato, en los planes de 1934 y 1938 (en éste también un griego), luego surgió la oposición ciencias/letras en el del 53 y después hubo una reducción implacable en las leyes de 1970 y 1990.

Ahora han sido ya tanto las ciencias como las letras (y el latín y el griego sobre todo) las que han sufrido el embate de las "nuevas humanidades" y de un pedagogismo igualitario por lo bajo que sólo propone una cultura elementalísima y luego especialismo.

¿Cómo enseñar el latín y el griego? No con la vieja rutina memorística, sino con un método comprensivo que se ocupe de la creación de mecanismos interpretativos, al tiempo de hacer ver la vigencia, todavía hoy, del léxico y de descubrir los valores culturales, literarios y de pensamiento de las lenguas antiguas, también vivos hoy.

El "método directo" que se practica en la enseñanza de las lenguas modernas puede ser útil en un momento inicial, no luego: el griego y el latín son lenguas no para hablarlas, sino para interpretar textos literarios y científicos y comprender el léxico español actual.



Por otra parte, es positiva la introducción en la Enseñanza Secundaria Obligatoria de una "cultura clásica" opcional, pero pienso que el peso principal debe estar en la enseñanza de la lengua, latina y griega, con todo lo que la envuelve. Pero esto exige espacio: imposible convivir con múltiples opcionalidades de títulos halagadores. Imposible

hacer algo útil, dentro de esa opcionalidad, con "mínimos" de un curso de dos horas semanales (para el griego) o de dos en iguales condiciones, para el latín, todo en una sola rama del bachillerato. El resto hay que negociarlo con las comunidades autónomas. Y ello entre amenazas constantes que desprestigian y desmoralizan.

Nosotros, desde la Sociedad Española de Estudios Clásicos, hemos propuesto un año de latín obligatorio para todos y dos de latín y dos de griego obligatorios en "humanidades y ciencias sociales" (como ahora llaman a esta rama), voluntarios en ciencias. Esto, aparte de la "cultura clásica".

Y pensamos que el latín y el griego deben volver a ser materias generales en las facultades que vienen de la de "filosofía y letras". Y hemos propuesto la creación de institutos de humanidades que impartan cursos voluntarios para estudiantes de otras facultades.

Por lo demás, los problemas de nuestra educación actual no sólo afectan a las lenguas clásicas. Haría falta un gran bachillerato que procurara una base cultural general. Y ello, para dos cosas. La primera, para que haya una importante elite que mantenga vivos valores centrales de la cultura española —aquí se insertan también las ciencias—, valores que se traducen en una creatividad siempre renovada. Otra, para que se atenúe el creciente divorcio entre las distintas especialidades, que es nocivo para ellas y para la visión del mundo de quienes las cultivan.

La verdad es que la democratización general del mundo ofrecía grandes esperanzas de verdadera ampliación del horizonte cultural de todos. Pero que, por obra de esas tendencias igualatorias por debajo que imponen los *gurús* pedagógicos, a lo único a que se llega es a la alfabetización acompañada de algunas habilidades y unos mínimos conocimientos básicos y, eso sí, a un florecimiento de las distintas especialidades, cada vez más aisladas unas de otras.

En el fondo hay, pienso, una cierta desconfianza en las capacidades intelectuales de las masas que llegan a la enseñanza. Se prefiere que hagan figuras con plastilina a que estudien lenguas clásicas u otras materias semejantes.

Las lenguas clásicas deben enseñarse como algo que es antiguo, de validez general por sí mismo. Y es al tiempo portador de valores y hechos culturales y lingüísticos que son signo de identidad de la cultura europea y española, incluidas sus variantes lingüísticas y regionales. Del latín vienen no sólo el castellano, también el catalán y el gallego; y el vasco está lleno de términos latinos. Y el griego y el latín nos conectan con Europa y con toda la cultura moderna.

Su enseñanza es un tema delicado, requiere tacto, método y sabiduría y, por parte del alumno, esfuerzo. Pero en este terreno de la didáctica se ha avanzado mucho desde momentos frecuentemente criticados de enseñanza rutinaria.

Solamente hace falta espacio y hace falta una concienciación del público, un aumento del prestigio social de las lenguas clásicas. Y no como mero recuerdo del que tuvieron en otro tiempo, también como algo necesario ahora como lazo de unión entre España y Europa y América, entre el presente y el pasado y entre las varias orientaciones intelectuales de nuestros días.

La enseñanza de la historia

Antonio Domínguez Ortíz, premio Príncipe de Asturias



Todos los pueblos, incluso los más primitivos, han tratado de perpetuar la memoria de sus orígenes y el recuerdo de sus hazañas. Ello forma parte de la memoria colectiva y de sus señas de identidad. Tras la conquista de la escritura las obras históricas, ya fantaseadas, ya sujetas a la más estricta objetividad, se multiplicaron y formaron parte de las bibliotecas personales y colectivas. Tardó más la historia en organizarse como disciplina docente; no aparece en los planes de estudio hasta la reorganización general de los sistemas educativos que tuvo lugar en los albores de la Edad Contemporánea: tanto en las universidades como en los centros de enseñanza primaria y secundaria se le concedió a la historia un puesto de honor.

Hoy ese lugar privilegiado está en peligro, y dentro de la crisis general que afecta a la enseñanza de las ciencias humanas hay otra específica que interesa directamente a la historia; se discute su utilidad, se censuran los métodos tradicionales de enseñanza, se recorta su ámbito en los planes de estudios y, lo que es peor, se intenta diluir su contenido en un espacio vago, de contornos mal definidos, en el que disciplinas más o menos afines intentan cobijarse y convivir bajo el rótulo de "ciencias sociales". ¿Qué puede opinar sobre esta situación un antiguo docente, poco al día en esta materia pero con amplia experiencia?

Ante todo, un rápido diagnóstico: la crisis de la enseñanza de la historia tiene raíces múltiples; de un lado, la multiplicación asombrosa del saber humano y la aparición de nuevos campos científicos, con presencia forzosa en la enseñanza, obliga a reducir la cuota de cada uno, porque la ciencia aumenta, pero la capacidad de absorción de los alumnos es la misma y las horas del día siguen siendo veinticuatro.

De otra parte, hay cierta prevención contra la historia; antes se ensalzó su valor como escuela de patriotismo; ahora, tras los desastres que ha traído a la humanidad el nacionalismo agresivo (herencia corrompida del

romanticismo) se la acusa de fomentar el orgullo, la insolidaridad y el racismo.

Y luego tenemos los problemas internos a la propia tarea del historiador: la especialización excesiva, los debates sobre el concepto de la historia, la oposición entre una historia *tradicional* y la centrada en los aspectos socioeconómicos. ¿Remedios, soluciones? En primer lugar, mantener la integridad y objetividad de la materia histórica, su independencia frente a los poderes fácticos y los grupos de presión; no convertirla en ningún momento en instrumento de propaganda. Que sea factor de paz, unidad y convivencia entre los humanos.

Después, asumir de forma ecléctica los cambios y avances realizados. No hay que desechar sin más la historia tradicional, la historia política, el elemento biográfico. Pueden y deben tener su puesto en una historia renovada.

Reconocer la prioridad de la historia del propio país y de nuestro propio tiempo. Pero que no se reduzca la historia a la de la propia nación (o región) y a los tiempos actuales; eso imposibilita una visión de conjunto y favorece localismos y prejuicios. No es admisible que una persona que haya recibido una formación cultural ignore, por ejemplo, quién fue Carlomagno.

Respetar la individualidad de la historia, compatible con los lazos que la unen a las ciencias humanas afines.

Y por último, que los responsables de la enseñanza no olviden que en el público hay una enorme apetencia de conocimiento histórico; si no lo adquiere por sus cauces normales se dirigirá hacia los folletines, los fascículos, las biografías noveladas y las películas supuestamente *históricas*. Sustitutivos cuya calidad no es siempre la mejor.

La enseñanza de la filosofía

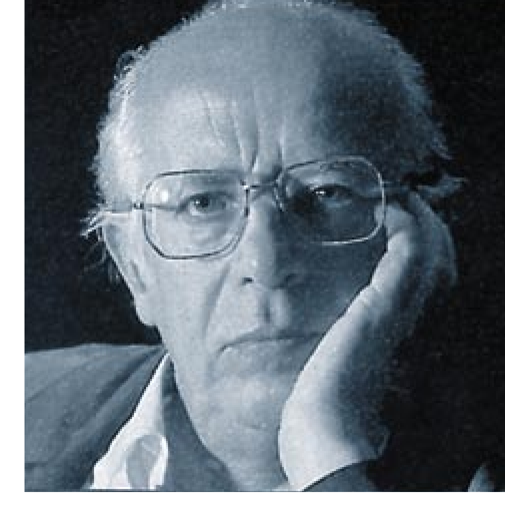
Emilio Lledó, de la Real Academia Española

En la cultura occidental hay un campo de saberes y experiencias intelectuales que se ha venido a llamar filosofía. Contra lo que suele creerse, tal palabra no oculta ninguna sabiduría misteriosa, alejada del hombre y de sus intereses. La filosofía fue, en sus comienzos griegos, una serie de preguntas y respuestas que algunos hombres se hicieron para entender el mundo que les rodeaba y la naturaleza que les constituía. Filosofía fue, pues, un maravilloso gesto de curiosidad y de vitalidad. Maravilloso porque el asombro, la extrañeza ante el mundo y el deseo de interpretarlo aparecían bajo ese asombro, promotor de esenciales preguntas. “¿Qué es lo que veo?” “¿Qué sentido tiene esto?” “¿Para qué vivir”? “¿Cómo vivir?” Sobre estas y otras parecidas preguntas, que fueron complicándose y agudizándose, se levantó un edificio teórico en el que, a lo largo de los siglos, se han almacenado muchas de las cuestiones que alimentan el espíritu humano.

La presencia de este edificio, en la tradición cultural, se ha hecho a través de los escritos de los filósofos; esos personajes que, desde los concretos presupuestos de cada época y como consciencia interpretadora y crítica de ella, nos entregaban su visión personal de la historia que los ceñía. El resultado de esas visiones es una sucesión de espejos en los que se reflejan problemas importantes del conocimiento y de la vida humana. Ese paisaje especulativo, cuyos límites marcan las palabras, es tan sutil y concreto que alcanza a los latidos de nuestra propia vida. El borde del lenguaje de los filósofos se levanta en la orilla paralela a ésta donde alienta y se consume nuestro tiempo.

Por eso todos somos filósofos; porque todos, o casi todos, hemos tenido que enfrentarnos alguna vez, aunque fuera equivocada o torpemente, con las cuestiones que ellos han planteado. Vivir es intentar entender, intentar juzgar, intentar saber. Y eso lo hacen todos los hombres.

Es, pues, un tesoro de valor incalculable el que, bajo el nombre de historia de la filosofía, tengamos extendida, a lo largo de veinticinco siglos, las experiencias y aventuras intelectuales de ese “animal que habla” y que lucha por la racionalidad.



Tener la posibilidad de tomar contacto con esas enseñanzas deslumbrantes y estimuladoras, y lograr que se incorporen a las estructuras de nuestra mente depende, en parte, de las instituciones que hoy administran la organización del saber. Es verdad que, a veces, ese saber filosófico ha caído en manos de enseñantes adormilados, incapaces de despertar el amor por el conocimiento; aniquiladores de la curiosidad y creatividad juvenil. Ciertos programadores de la organización educativa, respirando aún el aire arcaico que, tal vez, padecieron, y contagiados de un insolente y romo pragmatismo, han decretado que la filosofía ya no es de este mundo. Incapaces de llevar adelante el más simple proyecto científico original, de inventar la más elemental ecuación, han asumido, miméticamente, de otros países, que sí inventan y sí piensan, una ideología supuestamente realista y tecnocrática.

Más vivo que nunca, el inmenso saber acumulado en la filosofía sigue ante nosotros como un espejo luminoso donde, al reflejarnos, formamos parte de ese ideal paisaje. Ante él, recobramos instrumentos esenciales para seguir buscando la verdad, para defendernos de la mentira y la insidia, para descubrir lo justo y lo bueno, para interpretar las imágenes sin sustancia que llenan nuestro mundo. Olvidar la filosofía sería un estéril y cruel ejercicio de ceguera; hoy que es tan importante la luz y la mirada.

Perfiles

Marguerite Holloway

MIRIAM ROTHSCHILD: *Una historia natural de pulgas y mariposas*

En la mansión de Ashton Wold todo anda manga por hombro. Dentro y fuera. En primavera y verano el jardín se convierte en una maraña exuberante que crece sin orden ni concierto, dejado a sus anchas. Entremos en la sala de estar. Enorme y caótica: aquí una mesita con café y pastas, allá libros que se desbordan de las estanterías y se apilan en largas mesas (volúmenes sobre pulgas, aves de Israel, relación madre-hija, memoria... o láminas botánicas de Beatrix Potter). Penden cuadros de pájaros y mariposas, junto a fotografías de hijos y nietos y una de Walter Rothschild a lomos de Rotumah, su tortuga gigante. Nos rodean una lechuza disecada, jarrones de flores amarillas y de azucenas, montones de botes pequeños de semillas, dos perros que no cesan de ladrar, sofás por doquier.

Y Miriam Rothschild, cuyos intereses, logros y temperamento se extienden por campos no menos dispares. Hasta usa otro apellido —Lane— si le apetece. (Lane es el sobrenombre que dieron a su marido los británicos durante la Segunda Guerra Mundial.) Pero firma Rothschild en sus cerca de 350 artículos sobre entomología, neurofisiología, química y zoología; así aparece también en el nomenclátor de la Real Sociedad londinense.

Con ese apellido se le conocen una docena de libros, su implicación en el movimiento ecologista, su militancia en pro de un mejor trato a los animales, su galería dedicada a las obras de arte de los esquizofrénicos y mil causas más en que está empeñada esta mujer casi nonagenaria.

Los Rothschild —famosos en la banca y la política— han dado prodigiosos naturalistas: Walter, cuyas colecciones contaban con 2,25 millones de mariposas, 30.000 aves y 300.000 escarabajos; y Charles, el padre de Miriam, que reunió el inventario de afanípteros (pulgas) más completo del mundo. Desde niña quedó ella atraída por el mundo natural y el coleccionismo. Sus padres creían que una educación tradicional sería demasiado rígida, y la dejaron cancha libre para sus lecturas, intereses y aficiones. A los 17 años decidió ir a clase.

“Justo al comienzo de mi vida universitaria, si se quiere llamarla así, intenté cursar dos carreras al mismo tiempo: literatura inglesa y zoología. Pero se me hizo cuesta arriba. Nunca conseguía que cuadraran las clases. Si quería acudir a una lección sobre Ruskin, tenía a la misma hora que diseccionar un erizo de mar. No había manera.”



Rothschild acabó por escoger biología marina después de un trabajo de campo en Plymouth y un encuentro fortuito con G. C. Robson. “Me ofreció lo habido y por haber si me ponía a trabajar sobre sus caracoles marinos”, recuerda, e hizo las maletas para marchar a Italia con una beca. “Fui a casa y le dije a mi madre: Estarás contenta de saber que la Universidad de Londres me ha concedido una subvención para el laboratorio de Nápoles. Me callé que era la única que la había solicitado. Supuse que había llegado el momento de que dejaran de tratarme como la niña boba de la familia.”

No hubo tales caracoles, pero Rothschild se lo pasó de maravilla: “Mi problema en Nápoles era que entraba al trapo; me lanzaba a todo lo que se me ponía por delante porque ¡todo era tan fascinante!” Regresó a Inglaterra, y trabajó sobre los parásitos del caracol durante siete años, hasta que bombardearon su laboratorio de Plymouth en 1940. La destrucción fue horrible, pero también liberadora: “Sin darme cuenta, poco a poco me había convertido en un apéndice del ciclo vital de mis tremátodos.”

A principios de los años cuarenta se enroló en el grupo Enigma (o Ultra), organización creada para descifrar el sistema de comunicaciones alemán. Participaban otras biólogas. Se trataba, en efecto, de un grupo harto heterogéneo. “Estaba el campeón de ajedrez de Irlanda y todos esos sabios matemáticos. Pero las palma nos la llevamos las biólogas. Fue bastante divertido. De Enigma puedo decirle que no ganamos la guerra, pero la acortamos.”

Dejó Enigma para casarse. Se puso a investigar las palomas torcaces. Descubrió que estas aves transportaban la tuberculosis bovina. “La gente decía que había una raza diferente de palomas torcaces, que venían a este país en invierno, de un plumaje más oscuro.” Esta tonalidad le recordó a ella el adisonismo, que la gente padece cuando se infectan las glándulas suprarrenales por tuberculosis. “Fui al mercado, y allí diseccioné mis buenos capazos de palomas. Y entonces encontré esa tuberculosis en las suprarrenales.” (No le permitieron publicar sus resultados porque “le proporcionaba información al enemigo. Para morirse de risa”.)

Rothschild no califica la corazonada sobre la tuberculosis —ni cualquiera de sus otras importantes corazonadas— como producto de la intuición. “Para describir el talento que yo pueda tener, habría que decir que soy una buena observadora. Y eso significa no sólo fijarse en las cosas, sino reflexionar sobre eso de lo que uno se da cuenta.”

Tras la guerra, a la edad de 44 años, escribió su primer libro: *Fleas, Flukes and Cuckoos*, sobre los parásitos, y se concentró entonces en los fetiches familiares: los afanípteros. Charles, que, entre otras cosas, identificó la pulga que transmitía la peste, había legado sus diminutas legiones al Museo de Historia Natural de Londres, pero todavía estaban por catalogar. Seis hijos no supusieron traba alguna para Rothschild. “Me parece que en total debo haber perdido con mis hijos unos 10 años. Y en eso siempre he sido totalmente sincera: antes que las pulgas, prefiero los niños. No me supuso ningún sacrificio. Y en realidad nunca me he creído ni una palabra de esas mujeres que dicen que no podían dejar su trabajo: los niños son mucho más interesantes que cualquier carrera.”

Admite que es insomne crónica. “Me facilitó las cosas el poder ocuparme de los niños durante el día y realizar la morfología y la microscopía por la noche.” Al parecer también prescinde de otras tareas que le hacen perder el tiempo, como ir de tiendas. Lleva un vestido que ella misma cortó y confeccionó con retales.

Durante 20 años trabajó con un colaborador catalogando e investigando las peculiaridades de las pulgas: “Descubrí, por pura casualidad, que conocida la histología de la pulga se puede saber bastante de la histología de cualquier otro insecto.” Me muestra algunos dibujos. “Mire qué bocas más maravillosas. Las pulgas tienen un aparato bucal precioso. ¡Sí, señor!” Rothschild también descubrió cómo saltan las pulgas. Tienen una bola de resilina entre sus patas traseras. Esta sustancia elástica les permite brincar desde el suelo, doblando los apéndices, con una fuerza 140 veces mayor que la de la gravedad. Algunas lo hacen 30.000 veces sin parar.

En el curso de un estudio sobre la superpoblación de conejos en Australia, Rothschild descubrió el primer ejemplo de un parásito que se rige por las hormonas de su huésped. “Pude demostrar que la pulga había transferido el control de su ciclo reproductor al conejo. Sus ovarios sólo maduran bajo la influencia de las hormonas de las conejas preñadas”, explica. “Durante la copulación entre conejos adultos, las pulgas dejan al macho y se pasan a la hembra, que parece atraerlas en esa etapa. Luego, cuando queda preñada y el feto empieza a madurar, vamos a decirlo así, las pulgas siguen de cerca su ciclo. Y sus ovarios empiezan a desarrollarse. En el momento en que está pronta a parir, las pulgas responden a eso y en vez de seguir prendidas de la oreja de la coneja, como de costumbre, se sueltan, se tiran por la nariz y caen sobre los conejitos en el mismo momento en que nacen. Allí reciben otro conjunto de hormonas que les permite copular.” (Rothschild sostiene que tal sincronía puede explicar por qué las pulgas pican más a las mujeres que a los hombres.)

“Para describir el talento que yo pueda tener, habría que decir que soy una buena observadora. Y eso significa no sólo fijarse en las cosas, sino reflexionar sobre eso de lo que uno se da cuenta.”

Abandonó su trabajo sobre las hormonas cuando murió su colaborador en la Universidad de Oxford, Geoffrey W. Harris. “La cosa perdió su encanto.” Rothschild atribuye el éxito que a ella le corresponde a sus colaboradores. Junto con el premio Nobel Tadeus Reichstein, determinó que las mariposas reales sacan su veneno de los vencetósigos de su dieta. Continuó estudiando las mariposas (su primer amor, dice, y el tema de su último libro, *Butterfly Cooing like a Dove*) así como las toxinas y las señales químicas que emiten los insectos y las plantas.

Las plantas son, de hecho, su actual obsesión. Rothschild está visitando 180 lugares de las Islas Británicas de entre los 280 que su padre calificara en 1912 de áreas a proteger. Con ello espera determinar qué formas de gestión del suelo han fracasado. También ha dedicado 40 hectáreas de sus tierras a flores silvestres poco frecuentes, y vende las semillas para conservar la diversidad genética. Le deprimen la explosión demográfica y la destrucción del entorno natural. Pero “hay un pequeño signo esperanzador. Y es que ahora se están interesando un tipo diferente de personas. Odio la expresión ‘clases bajas’, pero así es”, dice. Hay “más y más gente sin cultura que se han ido interesando en el medio ambiente”.

Sus otras ocupaciones son ahora la memoria (su base química) y los derechos de los animales. Rothschild defiende la existencia de conciencia en los animales e intenta cambiar el trato que se les proporciona en establos y mataderos. Siente algunos remordimientos por experimentos que llevó a cabo en otros tiempos. “Se debería enseñar a la gente joven que *tienen* que considerar el valor del experimento antes de empezarlo. No basta, de ninguna manera, que parezca interesante. Pero uno está tan exaltado que pierde el sentido de la proporción.”

Además, Rothschild está estudiando la telepatía en perros y gatos, que al parecer son capaces de darse cuenta de que su dueño vuelve de un viaje o de que llama por teléfono, aunque ningún otro de la casa lo sepa. Ha puesto anuncios en el periódico (“Quienquiera que tenga un gato o un perro que sepa cuándo regresa usted, por favor, póngase en contacto conmigo”) y se halla pergeñando los experimentos para comprobar su teoría. “Hay cosas desconcertantes a propósito de los perros y la telepatía”, señala. Cuenta que cierta madrugada se despertó en Londres —lejos de su casa— con los ladridos de su perro. Telefoneó a Ashton Wold y le confirmaron que su perro llevaba un rato ladrando. “Probablemente sea una coincidencia, pero ahora siento como si tuviera que echarle una ojeada al asunto.”

Y luego está el artículo sobre mariquitas que tiene que leerse, así como algunos escritos de su padre que acaba de descubrir, y el jardín de flores bíblicas que quiere plantar y el libro que está escribiendo sobre Proust y la meteorología. Siempre ha rehuido escribir sobre cosas “ya trilladas”. Pero en fin, el arte y la ciencia no están tan lejos. “Lo grande es que creo que son los dos muy similares, y que deben ir juntos”, dice. “Es que yo soy una aficionada, no una zoóloga profesional. Porque si lo fuera, la vida me habría obligado a ceñirme mucho más.”

Ciencia y sociedad

Neurología

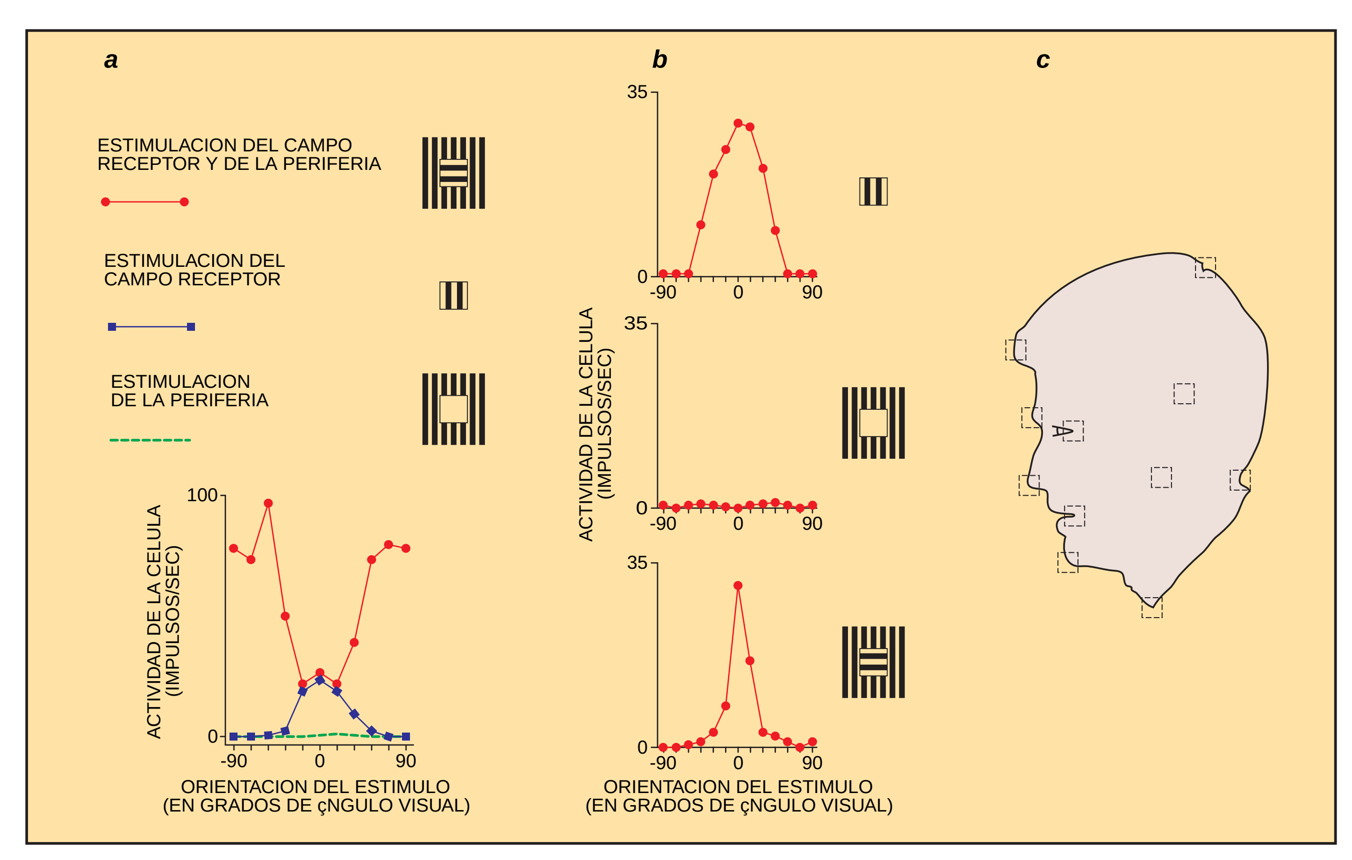
Primeros pasos en la detección de formas

Todos los días de nuestra vida y desde el momento en que abrimos los ojos al despertar, experimentamos un proceso realmente sorprendente: vemos e identificamos el mundo que nos rodea.

Debido a la óptica de nuestro ojo, las imágenes de los objetos que observamos se proyectan en nuestra retina deformadas, pequeñas e invertidas. Pese a partir de estos extraños patrones de estimulación, percibimos un mundo repleto de formas. ¿Qué ocurre después de que un objeto se proyecta en nuestra retina? Una tentación fácil sería decir que la imagen retiniana es la que nosotros interpretamos como real, es decir, daríamos verosimilitud a una expresión coloquial: vemos con nuestros ojos. Pero esto es tan inexacto e incompleto como decir que oímos con nuestros oídos o que olemos con nuestra nariz. Detrás de nuestro ojo, millones de neuronas se organizan para constituir las más de 30 áreas dedicadas al procesamiento de la información visual, para que podamos interpretar aquella imagen que se proyectó, pequeña y deformada, sobre nuestra retina.

Imaginemos a un observador sentado en una terraza. Su campo visual, la zona del espacio que puede ver, se encuentra poblado de objetos (formas) estáticos o en movimiento y repletos de color. ¿Cómo se las arregla nuestro cerebro "visual" para recibir primero, e interpretar después, tan variopinta información? Cualquier objeto que se sitúe delante de nuestros ojos se proyectará en la retina. Aquí, las células se disponen en un mosaico: cada una de ellas recibe información de una zona muy pequeña del campo visual, su campo receptor y el estímulo produce un aumento de la actividad eléctrica de la célula. Esta información se envía hacia la corteza cerebral, pasando previamente por una estación intermedia, el núcleo geniculado. Parece lógico, por tanto, que, al estudiar cómo responden las células individuales ante los estímulos luminosos, podamos entender un poco mejor el procesamiento de la visión, y cómo la corteza extrae la información relativa a la forma de los objetos.

Cuando uno registra la actividad de una célula cortical estimulada, sufre una primera decepción. Solamente responde ante estímulos muy simples, como barras de luz que se mueven



La respuesta óptima de una neurona, según se juzga por la estimulación de su campo receptor clásico, experimenta un drástico incremento si se estimula a la vez la periferia circundante (a). *Por sí mismo, el estímulo periférico no activa la célula; sin embargo, combinado con el del campo receptor, la nueva configuración se vuelve muy efectiva. Incluso un estímulo con orientación que no sea la óptima (–90º) puede resultar sumamente eficaz si se combina con la estimulación de un área circundante siempre y cuando difieran en la orientación* (b). *Este tipo de respuestas nos permiten detectar discontinuidades, esquinas por ejemplo, presentes en la imagen* (c).

o patrones en forma de enrejados constituidos por una sucesión alternante de barras blancas y negras. ¿De qué nos vale una información tan elemental?

Las primeras respuestas nos las proporcionaron, en los años sesenta, David Hubel y Torsten Wiesel. Descubrieron que la mayoría de las células de la corteza eran sensibles a la orientación y a la dirección de un estímulo cuando éste se movía sobre el campo receptor. Sugirieron que tales células representaban los estadios iniciales en la percepción de la forma, de tal manera que los contornos de un objeto se analizaban mediante la extracción de los detalles acerca de su curvatura, representados por las tangentes en cada punto. Este tipo de procesamiento elemental ocurría en las zonas que llamamos corteza primaria (V1), es decir, las partes que reciben información directa desde el núcleo geniculado lateral. A partir de aquí la información se difundiría hacia otras áreas del cerebro en donde los campos receptores de las neuronas son mayores, el procesamiento de la información es más elaborado, y en donde las células responden a estímulos más complejos, como ángulos, curvaturas o incluso caras.

En ese esquema clásico, las respuestas de las neuronas de V1 son fijas y estereotipadas. Su campo receptor, bien delimitado, aparece como inmutable. Existe, sin embargo, la posibilidad cada vez más aceptada de que tal rigidez no exista, y que los campos receptores sean plásticos, en consonancia con lo que ocurre en todo el sistema nervioso. Así, sabemos que la actividad producida por un estímulo puede modularse con la presencia de otros que rodean el campo receptor "clásico", y que por sí mismos no producen respuesta alguna en la célula que estudiamos.

Recientemente el autor en colaboración con el grupo del profesor Adam Sillito, del Instituto el Oftalmología de Londres, decidieron abordar el problema anterior con la convicción de que los campos receptores de las neuronas de V1, el área que representa el primer paso en el procesamiento visual en la corteza, habría de ser más flexible de lo que se venía admitiendo, y que estas neuronas desempeñan un importante papel en la detección de las formas, siendo capaces de proporcionar información compleja, como la que suele atribuirse a otras áreas jerárquicamente más elevadas.

Diseñamos un estímulo visual que presentamos a gatos y a monos, mientras registrábamos la actividad eléctrica de las células del área V1. Consistía en un enrejado en movimiento (patrón alternante de barras claras y oscuras) de tamaño óptimo, con el que estimulábamos la totalidad del campo receptor de las neuronas y cuya orientación variaba; obtuvimos una curva de preferencia a la orientación. Conseguida la respuesta control descrita, modificábamos luego el estímulo para abarcar la región que rodea al campo receptor, pero no a éste. Comprobamos así que la célula objeto de estudio no cambiaba su actividad al estimular la periferia inmediata de su campo receptor. Después, mezclamos ambos estímulos; es decir, estimulamos a la vez el campo receptor "clásico" y la zona circundante.

Nos encontramos con unos resultados sorprendentes. La periferia, por sí sola, no alteraba la actividad de las células; ahora bien, cuando se combinaba con la estimulación del campo receptor, la respuesta de las neuronas se incrementaba drásticamente, superando lo que se consideraba respuesta óptima a la estimulación del campo receptor aislado.

Pero las sorpresas no acabaron ahí. El curioso efecto que estábamos observando aparecía sólo cuando la orientación del estímulo de la periferia y del campo receptor eran notablemente distintas, y en muchas ocasiones el mayor incremento de descarga se obtenía cuando eran ortogonales. Más aún. La especificidad de orientación del estímulo como propiedad importante del campo receptor parecía tambalearse. O para ser más exactos, modularse. En efecto, dicha especificidad aparecía al estimular sólo el campo receptor, y así, la célula respondía de forma óptima para una orientación (digamos de 0 grados), pero no para otra (de –90º grados). Pero si manteníamos el estímulo sobre el campo receptor con la última orientación, fija a –90º, y estimulábamos la periferia al mismo tiempo, la célula se activaba de forma vigorosa. Las neuronas no respondían a los estímulos por separado, sino a la configuración de ambos. El incremento de descarga, en realidad, señalaba la discontinuidad presente en una zona del campo visual, porque ningún componente del estímulo por sí mismo era efectivo.

Lo que hemos descrito demuestra que en estadios precoces del procesamiento, como corresponde a la corteza primaria, la células muestran una plasticidad inmediata en lo que se refiere a su respuesta ante la estimulación del campo receptor. Varían la respuesta a tenor de la configuración de la imagen, de forma que lo que ahora no "interesa" a la célula, en el instante siguiente la activa, por la sencilla razón de que la combinación espacial del estímulo es la apropiada.

En virtud de ello, proponemos la existencia de un mecanismo, dependiente de la orientación, capaz de integrar información de zonas adyacentes del espacio visual y de contribuir a detectar discontinuidades focales de la imagen, por ejemplo, uniones o esquinas. Este tipo de proceso puede ser muy útil para la representación de las formas de los objetos. Las células que hemos descrito proporcionarían información sobre las discontinuidades presentes, como si solamente integrasen información visual encuadrada en discretas ventanas de la escena visual.

JAVIER CUDEIRO
Escuela Universitaria de Fisioterapia. La Coruña

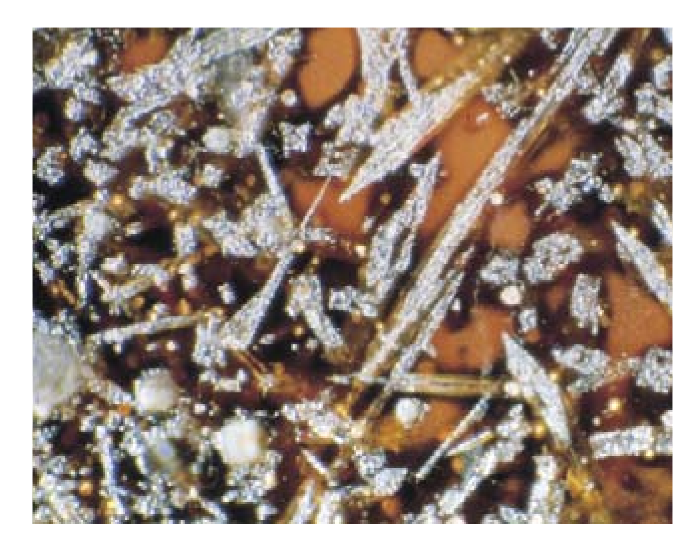
Edad del Hierro

Vista al microscopio

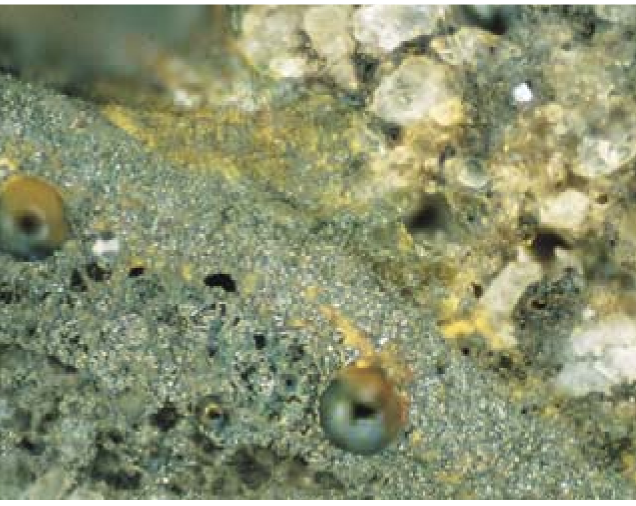
Abunda la información arqueológica de la metalurgia productiva de la edad del Hierro en la península Ibérica. Escasean, sin embargo, los estudios analíticos. La microscopía, que desde hace décadas se viene aplicando a la investigación de los objetos elaborados con metales, puede cumplir también una función única en otros aspectos de la metalurgia.

En el transcurso de los últimos mil años que precedieron al nacimiento de Cristo, se irá agregando, a la metalistería de base cobre y metales preciosos, el trabajo del hierro. Por lo que respecta al cobre y al bronce no se conocen hornos de fundición donde los metalúrgicos redujeron los minerales. Los restos arqueológicos hallados en poblados de la edad del Hierro —La Campa Torres (Asturias), El Castrelín, La Corona de Corporales, Castro de Hinojo y Castro de Pedredo (León), Medellín (Badajoz), Castro de Barahones (Palencia) y otros— indican que la reducción se realizaba en "vasijas-horno", cuencos de cerámica.

Tales vasijas son recipientes de tamaño apreciable, similares a las



Metalurgia de cobre y bronce. Microfotografía de la sección de una escoria de Campa Torres (Gijón) con abundantes cristalizaciones aciculares de casiterita. Campo oscuro. 200x



Metalurgia de hierro. Microfotografía de una escoria de Campa Torres (Gijón). Estructura irregular con numerosos granos de cuarzo blanco sin fundir totalmente. Campo oscuro. 80x

cerámicas domésticas y que se caracterizan por presentar escoriaciones en la cara interna mientras que la externa no muestra signos de afectación térmica. Se rellenaban de minerales y carbón vegetal, avivando la combustión mediante un chorro de aire forzado para conseguir elevar la temperatura hasta los valores necesarios.

Los minerales se desmenuzaban antes para aumentar la superficie de contacto con el agente reductor (carbón y monóxido de carbono). El metal obtenido en estos sencillos hornos aparecía en forma de pequeños goterones o nódulos y filamentos, embebidos en una masa de mineral parcialmente reducido y fundido de la que se extraían triturándola. Posteriormente estas porciones de metal se sometían a otro proceso de fundición en crisoles, cuyo contenido se vertía en los moldes.

El estudio microscópico de las escoriaciones en las vasijas-horno muestra la presencia frecuente de óxidos de hierro (wustita y magnetita). De ello se infiere que las condiciones reductoras del proceso eran poco estrictas, con pérdida excesiva de mineral y arrastre de metal. Las estructuras mineralógicas formadas indican temperaturas de trabajo que podían alcanzar los 1100-1200 ºC. Son muy pocas las pruebas de hornos más complejos; se limitan a fragmentos de revestimientos, como los hallados en El Castrejón de Capote (Badajoz), El Castrelín (León) y Piedra de Angeles (Valencia). No se conocen tampoco escorias de sangrado.

La escasez de escorias de cobre en toda la prehistoria peninsular nos revela el uso escaso de fundentes adecuados para la formación de auténticas escorias, que se compensa con el aprovechamiento de menas seleccionadas por su pureza, desechándose las que contuvieran mucha ganga.

En cuanto a la siderurgia, se advierte, asimismo, el estadio rudimentario de la técnica empleada. Por el registro arqueológico sabemos que se utilizaban hornos de menos de 50 centímetros de diámetro. El hallazgo de tortas de escorias formadas en el fondo del horno en los yacimientos de Picu Castiellu o La Campa Torres (Asturias) ratifica que no eran hornos de sangrado. Antes bien, en ellos se reducían óxidos de hierro con la ayuda de silicatos fundentes (arena cuarcítica). El ambiente del horno no lograba liberar todo el hierro presente; eso explica la concentración de wustita y magnetita en las escorias.

En suma, durante la edad del Hierro se utilizaron en la península Ibérica unos métodos para la producción de cobre y de hierro que, al contrario de lo que se venía pensando, descansan en una técnica rudimentaria, incapaz de obtener porciones significativas de metal. El empleo de hornos muy sencillos hasta época romana para cobre y bronce, minerales de elevada pureza con poca ganga y la no utilización de fundentes, explica la escasez e incluso inexistencia de escorias en yacimientos meticulosamente excavados. Dichas escorias, cuando existen, suelen arrastrar mucho mineral o metal, lo cual es coherente con el carácter elemental de los hornos de vasija. Hemos descubierto también la obtención de bronce por reducción directa en el horno de minerales de cobre y estaño. Por lo que respecta al hierro, las características técnicas son muy similares. Hornos de pequeña capacidad, sin sangrado de escorias y donde el inadecuado uso de fundentes motivaba grandes pérdidas de mineral, si bien es cierto que muchas de estas escorias se reutilizarían en fundiciones posteriores para extraerles todo el metal posible.

PABLO GÓMEZ RAMOS
Universidad Autónoma de Madrid

Las jaras

Autogamia castigada

Las jaras que vemos en laderas y collados pertenecen al género *Cistus*. Integrado por una veintena de especies, que hallan acomodo principal en el occidente mediterráneo, el género *Cistus* despliega en la península Ibérica su mayor diversidad. Se convierten aquí en elementos característicos de diferentes tipos de matorral, desde los propios de suelos ácidos hasta los de suelos básicos y con distintos requerimientos de humedad edáfica.

Esos arbustos desarrollan flores muy llamativas, grandes y de colores vivos. La vistosidad de su corola, junto a la elevada producción de polen que los insectos aprovechan para su alimentación, constituyen





Jaras de España. De izquierda a derecha: Cistus ladanifer, C. albidus *y* C. salvifolius

los reclamos destinados a atraer a los insectos (ápidos, principalmente) encargados de la polinización.

Su particular modo de reproducción ha despertado el interés de los científicos desde hace tiempo. Sin embargo, pese a los trabajos realizados en ese ámbito, quedan todavía lagunas importantes. La autora ha estudiado algunos aspectos de la biología de la reproducción en *Cistus albidus*, una de las especies más representativas de los matorrales calizos del este peninsular.

La vida de la flor es efímera: se abre al amanecer y así permanece unas 12 horas. Pierde luego los pétalos; los sépalos comienzan entonces a replegarse encerrando el androceo (parte masculina de la flor) y el gineceo (parte femenina), de forma que ambos pueden entrar en contacto. M. Martín y E. Guinea llamaron "polinización forzada" a este mecanismo, al dar por supuesto que permite la producción de frutos y semillas por autogamia cuando la flor se cierra por alguna causa sin haber sido polinizada desde el exterior por insectos.

Pero nosotros hemos comprobado que, en el caso de las flores de *C. albidus*, cuando se mantienen embolsadas desde antes de la antesis hasta su cierre no fructifican. De lo que se infiere que tampoco se autopolinizan y, por tanto, no se produce ninguna polinización forzada. Tales resultados coinciden con los obtenidos recientemente por V. Brandt y G. Gottsberger, del Instituto Botánico de la Universidad Justus Liebig de Giessen, en *C. crispus*, C. *ladanifer* y *C. salvifolius*. Cabe, pues, presumir que el fenómeno de la autopolinización no se da en ninguna especie del género *Cistus*.

Por otra parte, y en relación con la ecología del arbusto, se ha comprobado que el porcentaje medio de fructificación de las plantas que crecen en ambientes con gran insolación es de un 60,8 %. La cifra de fructificación baja al 17,2 % entre las que crecen en lugares sombreados, donde mengua, asimismo, la producción de flores; por lo que resulta palmario que la capacidad reproductiva, expresada en la producción total de semillas, cae notabilísimamente en las plantas que medran en medios umbríos.

Tenemos, pues, que se requiere una intensa insolación para producir flores y frutos en cantidad que pueda considerarse normal para la planta, aunque florezca y germine en otras condiciones. Esta observación avala la perfecta sincronía entre la reproducción y la ecología de la planta que caracteriza a los matorrales mediterráneos.

El aspecto más controvertido de la reproducción de las jaras reside en el bajo rendimiento de las autopolinizaciones. Se ha comprobado que, cuando las flores se fecundan manualmente con polen propio, el número de frutos que se obtiene es muy pequeño en comparación con el que se obtiene por alopolinización, bien sea manual o mediante insectos. Para explicar esa asimetría se ha sugerido que estas especies presentan algún sistema de autoincompatibilidad, es decir, mecanismos que impiden la fecundación por autogamia, aun cuando el polen sea perfectamente viable.

En las plantas encontramos tres mecanismos principales de autoincompatibilidad que, con diferentes mecanismos de regulación genética, tienen en común esta característica: cuando se autopolinizan las flores de plantas autoincompatibles, el tubo polínico o bien no llega a desarrollarse o no supera la longitud del estilo (filamento del pistilo). A esos tres mecanismos habituales puede añadirse un cuarto, más raro. Conocido por autoincompatibilidad de acción tardía, en ésta el tubo polínico alcanza los primordios seminales e incluso puede darse la liberación de gametos, pero no se avanza en la fecundación. Por mor de cualquiera de esos cuatro mecanismos, con sus características asociadas, se impide, pues, la fecundación autogámica.

Pero en las jaras no se da ninguno de estos mecanismos de autoincompatibilidad. Cierto es que se opera una drástica reducción en el porcentaje de fructificación por autogamia, pero se forman frutos que contienen el mismo número y calidad de semillas que los frutos resultantes de polinizaciones alógamas. Para explicar este curioso fenómeno, J. Bosch, de la Universidad Central de Barcelona, sugirió la posibilidad de que en el género *Cistus* se rompiera el sistema de autoincompatibilidad bajo ciertas circunstancias.

Para profundizar en esa línea, nos propusimos establecer si realmente

existía algún mecanismo por el cual la planta distinguía del polen de otros individuos el suyo propio, mecanismo que a su vez difiriera de los cuatro arriba mencionados.

Descubrimos así que se daba una notable diferencia en el tiempo de crecimiento del tubo polínico según se tratara de polen propio o de otra planta; en el primer caso es mucho mas lento que en el segundo. Para observar el desarrollo del tubo polínico a través del estilo de la flor recurrimos al microscopio de fluorescencia. Vimos que el polen procedente de otra planta alcanzaba el ovario en treinta minutos; por contra, ese intervalo temporal era el que invertía el tubo polínico de polen procedente de la misma flor en recorrer sólo una tercera parte del estilo. De lo que se desprende que, cuando sobre el estigma de una flor se poliniza con polen procedente de ésta y de otra planta, la mayor velocidad en el desarrollo del tubo polínico de la segunda determinará que las semillas originadas sean de procedencia alógama. Así se favorece la polinización cruzada sin bloquear del todo la autogamia.

Nos hallamos, pues, ante una forma de discriminación conocida por autoincompatibilidad críptica. Este mecanismo oculto, de ahí su nombre, que A. J. Bateman descubrió en una crucífera en 1956, no parece que abunde en el reino vegetal. Hasta el momento sólo se ha confirmado en especies de cuatro familias (Boraginaceae, Pontederiaceae, Onagraceae y Cruciferae).

Pese a hablarse de autoincompatibilidad, el hecho de que exista fecundación y formación de semillas indica que de lo que se trata en realidad es de un fenómeno de reducción en la capacidad reproductiva por autogamia. Este mecanismo actuaría en la producción del zigoto y estaría determinado por el genotipo del zigoto resultante; no dependería, pues, del juego entre los genotipos de la planta receptora y donadora de polen, como ocurre en los mecanismos de autoincompatibilidad descritos.

Aunque carecemos de información relativa a otras jaras, los rasgos genéricos que comparten en punto a biología de la reproducción dan pie a suponer que esta reducción operada en la autogamia afecta a todas ellas.

ISABEL MATEU
Depto. Biología Vegetal
Universidad de Valencia

Parasitosis de los équidos

Babesiosis

La babesiosis equina es una enfermedad producida por parásitos piroplásmidos del género *Babesia*. No sólo constituye un problema sanitario, sino también económico y social por el riesgo de mortalidad y baja producción. Ello ha entrañado que, en ocasiones, en los Juegos Olímpicos, se haya impedido la participación en las pruebas hípicas de algunos países que concurrían con animales seropositivos, sintomáticos o no.

La piroplasmosis, como también se la conoce, está extendida por Europa, Africa, Asia y América. Se halla perfectamente localizada, cuando se presenta, en Estados Unidos, Australia, Reino Unido, Alemania, Suiza, Austria y Japón. En muchos de estos lugares, existe el vector —la garrapata— por lo que, dada una importación del parásito, podría producirse un brote de esta enfermedad.

El parásito se transmite por artrópodos vectores de la familia Ixodidae (garrapatas), de los géneros *Dermacentor*, *Rhipicephalus* e *Hyalomma*. Al succionar éstos sangre de un équido parasitado para nutrirse, ingieren junto a ella el protozoo y, tras evolucionar en el interior de este hospedador invertebrado, pasa a un nuevo solípedo.

Los causantes de la enfermedad son dos especies de *Babesia*, de diferente morfología y ciclos de vida. Muestran también diferencias morfométricas, isoenzimáticas e inmunitarias. Lo mismo la especie piriforme (*Babesia caballi*) que la esférica (*Babesia equi*) presentan reproducción alternante, es decir, alternan fases de reproducción sexual entre gametos diferenciados, masculinos y femeninos (gametogonia), y fases de multiplicación asexual (esporogonia y merogonia). La multiplicación esporogónica se produce en células de las glándulas salivares de la garrapata, dando lugar a la formación de esporozoitos, elementos infectantes para el hospedador vertebrado. La merogonia, un sistema de división asexual no bien conocido, da lugar a la formación de merozoitos, formas intraeritrocitarias del parásito.

Babesia caballi desarrolla en los eritrocitos del caballo la fase de merogonia, pudiendo encontrar en la garrapata las fases de gametogonia y esporogonia. Se transmite de una generación a otra ocupando el ovario del ixódido y acompañando en su desarrollo a la nueva generación de garrapatas, hasta que las ninfas o adultos, al succionar sangre a otro equino, las inoculan. El protozoo mide de tres a cuatro micrometros; presenta escasa actividad patógena; su sensibilidad a quimioterápicos difiere respecto a la otra especie.

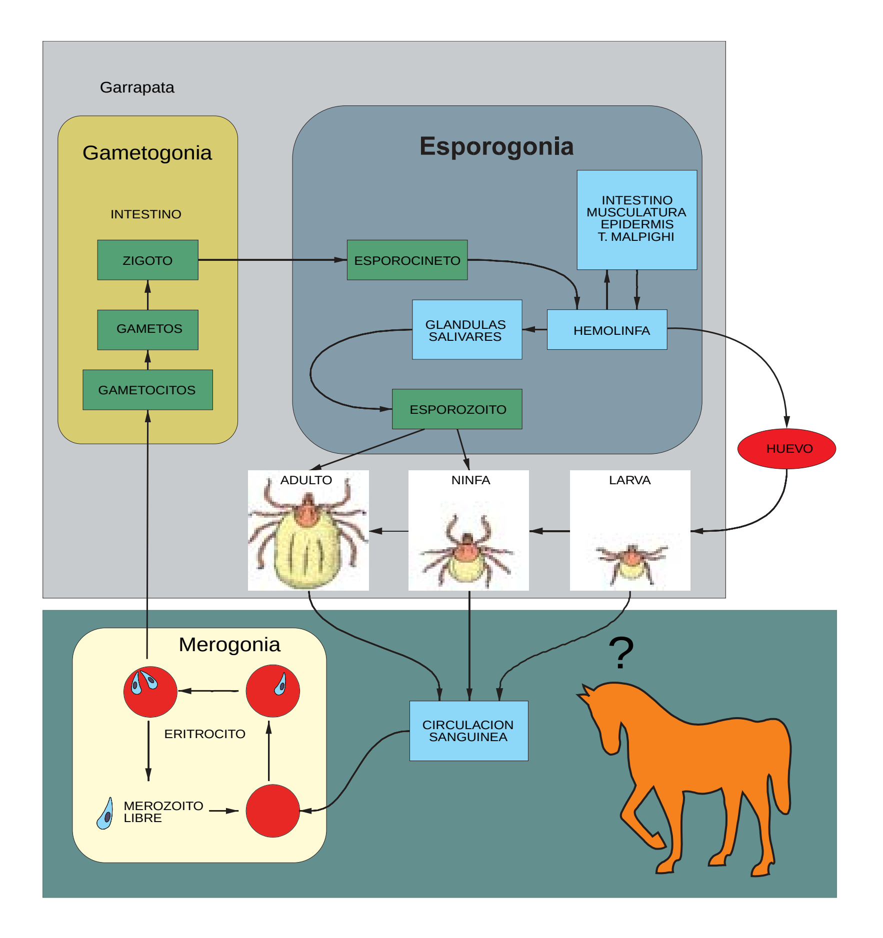
Babesia equi tiene dos multiplicaciones asexuales en el équido; ocurre la primera en las células linfocitarias (cuerpos azules de Koch) y la segunda en los eritrocitos. La transmisión es siempre transestadial, o fase a fase, es decir, infectada la garrapata como larva, transmitirá el parásito como ninfa o adulto, o infectada como ninfa lo transmitirá como adulto. De tamaño pequeño (1-2 μm) y notable pleomorfismo, se presenta con frecuencia en número de cuatro en el eritrocito, formando la llamada "cruz de malta".

Aunque en 1934, Alamarza Herranz denuncia en Badajoz el primer caso de babesiosis equina por *B. equi*, y, en 1974, se producen sendos hallazgos por los equipos de Cordero del Campillo, de la Facultad de Veterinaria de León, y Martínez-Gómez, de la de Córdoba, no existen estudios epidemiológicos de ninguna región de España, salvo los realizados por nosotros en Extremadura.

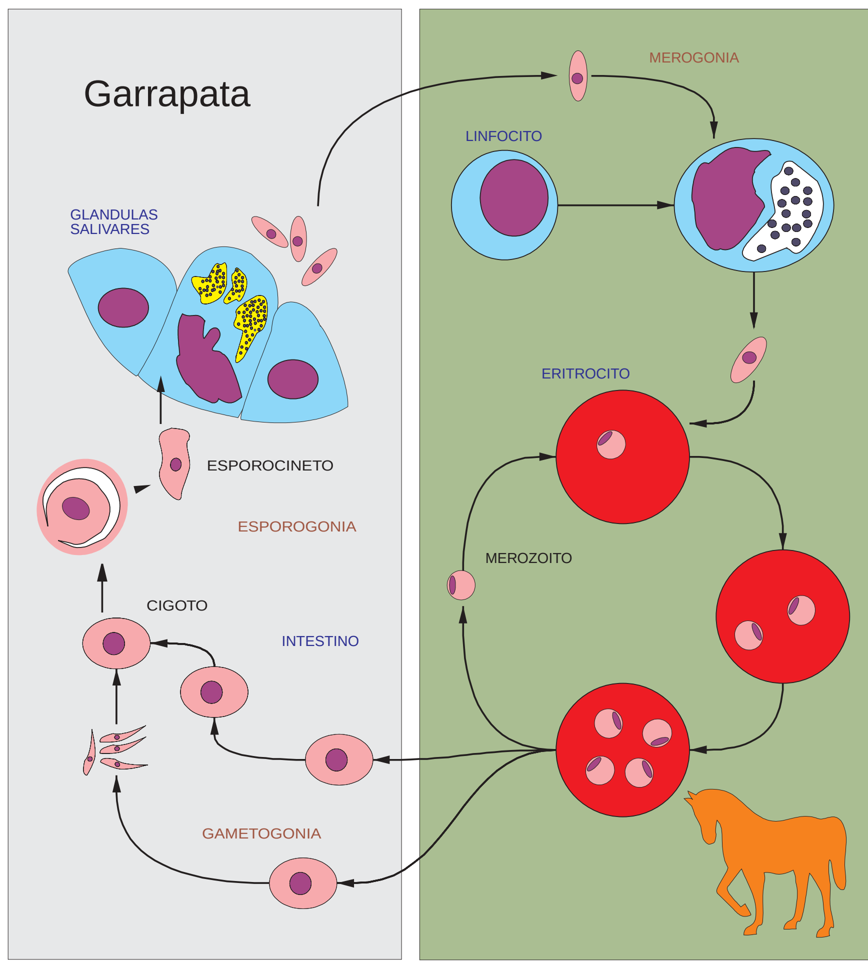
Desde que en 1984 se abrió la consulta parasitológica del Hospital Universitario Veterinario de Cáceres,



1. Hemorragia en mucosa (conjuntiva) como consecuencia de la coagulación intravascular diseminada que tiene lugar en la babesiosis por Babesia equi



2. Ciclo de vida de Babesia caballi *en sus dos hospedadores —intermediario, la garrapata, y definitivo, el caballo—. En la garrapata hembra, tras su reproducción, el parásito pasa al huevo transmitiéndose así a la siguiente generación de ixódidos vectores*



3. Ciclo de vida de Babesia equi. *En el hospedador definitivo, el caballo, presenta dos multiplicaciones asexuales, en linfocitos y eritrocitos. En el hospedador intermediario, el parásito pasa directamente a glándulas salivares*

se han venido recibiendo muestras de suero sanguíneo de équidos de casi todas las regiones, sospechosos de padecer la enfermedad o simplemente para conocer, por inmunofluorescencia indirecta, el estado inmunitario de caballos para la exportación. El muestreo, al no estar definido de antemano, no resulta de utilidad como estudio epidemiológico. No tiene más valor que el carácter orientativo acerca de la distribución de la babesiosis en España.

Así, de Andalucía han resultado seropositivas el 22,5 y el 55,1 % de las muestras remitidas, respectivamente para *B. caballi* y *B. equi*; de Cataluña el 13,4 y el 58,5 %; de Castilla La Mancha el 12,7 y el 61,7 %; de Extremadura, el 14,3 y 81,4, respectivamente; de Madrid, el 7,5 y el 45,0 % y de Valencia, el 14,3 y 48,8 %.

Respecto a otras regiones, hemos encontrado muestras positivas frente a antígeno de *B. caballi* en Castilla León y País Vasco, y frente a *B. equi* en Aragón, Baleares, Castilla León y País Vasco. Estos datos están sin cuantificar por el escaso número de muestras recibidas. Las procedentes de Asturias y Galicia, resultaron todas negativas. La media de positividad para España se establece en el 15,1 y 57,5 %, respectivamente.

La enfermedad, en su forma aguda, cursa con fiebre, taquicardia, disnea, apatía, anemia hemolítica, hemorragias, hepatomegalia, esplenomegalia, hemoglobinuria (sobre todo en el caso de *B. equi*) e ictericia. Puede llegar a hacer crisis con desenlace fatal para el animal. El curso crónico se caracteriza por un gran período de prepatencia, que puede

durar desde meses hasta cuatro años, en el que se manifiestan los signos de adelgazamiento, debilidad (sobre todo del tercio posterior) y predisposición al padecimiento de otros procesos concomitantes.

En nuestra experiencia, hemos encontrado que, en el caso de parasitaciones por *B. equi*, el 71,3 % de los équidos presentaban lo que hemos dado en llamar un síndrome típico (fiebre, astenia, anemia, ictericia, hemoglobinuria, taquicardia, disnea); en el 16,7 % sólo se advertía un descenso en el rendimiento, el 7,4 % de los équidos cursaba con cólico y el 4,6 % presentaba encefalitis.

Respecto a parasitaciones por *B. caballi*, el 65,5 % cursaban con el síndrome típico, mientras que el 34,5 % sólo evidenciaron descenso en el rendimiento.

No es fácil establecer un diagnóstico clínico, pues los síntomas y lesiones que se observan no se pueden definir como patognomónicos (es decir, exclusivos de la enfermedad). El diagnóstico asertivo muestra mayor fiabilidad. Éste se realiza mediante observación microscópica de frotis teñidos con Giemsa (al comienzo de enfermedad, ya que la presencia del parásito en eritrocitos de sangre periférica ocurre sólo en los primeros días), o mediante la detección de anticuerpos o antígenos circulantes por métodos inmuno-serológicos, o por detección, tras amplificación, de ácidos nucleicos del parásito o fracciones de ellos.

En la parasitación por *B. caballi*, resulta eficaz el tratamiento con aceturato de diminaceno (BERENIL©) y el dipropianato de imidocarb (IMIZOL©), en doble inyección intramuscular, pudiendo llegar a eliminar al parásito. Su eficacia es escasa en el caso de *B. equi*. En la infección aguda por este parásito, resulta eficaz, sólo para controlar la infección (quedando el hospedador como portador), el tratamiento con Parvaquona (CLEXÓN©) o Buparvaquona (BUTALEX©), en doble inoculación intramuscular o intravenosa.

Respecto a la profilaxis, debido a la inexistencia de vacunas eficaces, indicamos como medida útil la lucha contra la garrapata (vector de la enfermedad), impidiendo el contacto de ambos hospedadores (caballo e ixódido) y, por consiguiente, la transmisión de *Babesia* de uno a otro.



4. Merozoito penetrando en un eritrocito

IGNACIO NAVARRETE
Cátedra de Parasitología
y Enfermedades Parasitarias
Facultad de Veterinaria
Universidad de Extremadura

De cerca

Domingo Aerden

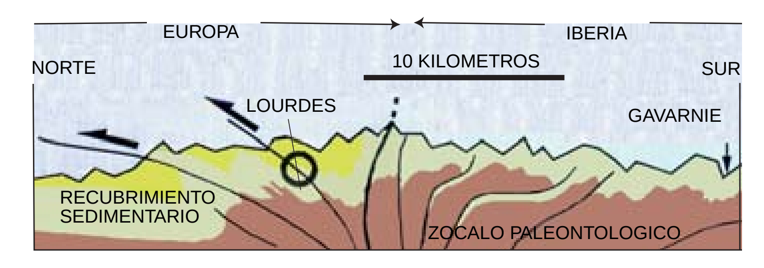
Movimiento plasmado en roca

No, no se trata de una hermosa obra de arte moderno: es una muestra de roca. Con ella se ha preparado una lámina muy delgada (tres centésimas de milímetro de espesor), observada a través de un microscopio polarizador. La luz polarizada permite examinar la estructura cristalina de la roca. La muestra procede de Lourdes. Hace algo más de 50 millones de años, se produjo una compresión en la cadena pirenaica, entonces en formación, por efecto de la colisión de las placas de Europa e Iberia.

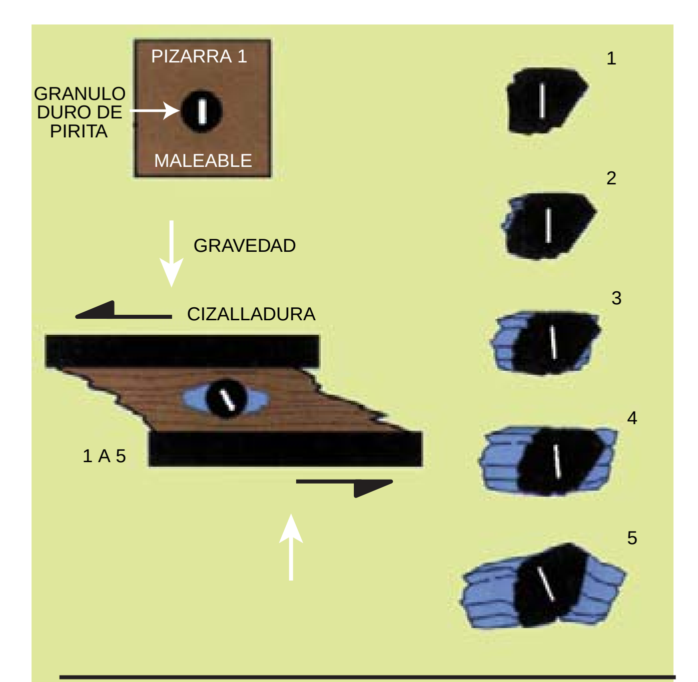
Inicialmente, la roca se depositó en forma de sedimento arcilloso en el fondo de un mar que cubría la región. Se vio arrastrada después hasta una profundidad de unos diez kilómetros a lo largo de una gran falla (*véase la figura 1*). Por efecto del calor y de las intensas presiones existentes a tal profundidad, se produjo la formación de cristales de pirita metamórfica en el seno de la roca. La roca se fue después deformando suavemente durante varios millones de años, y adquirió la propiedad de exfoliación propia de las pizarras, denominada “esquistosidad”.

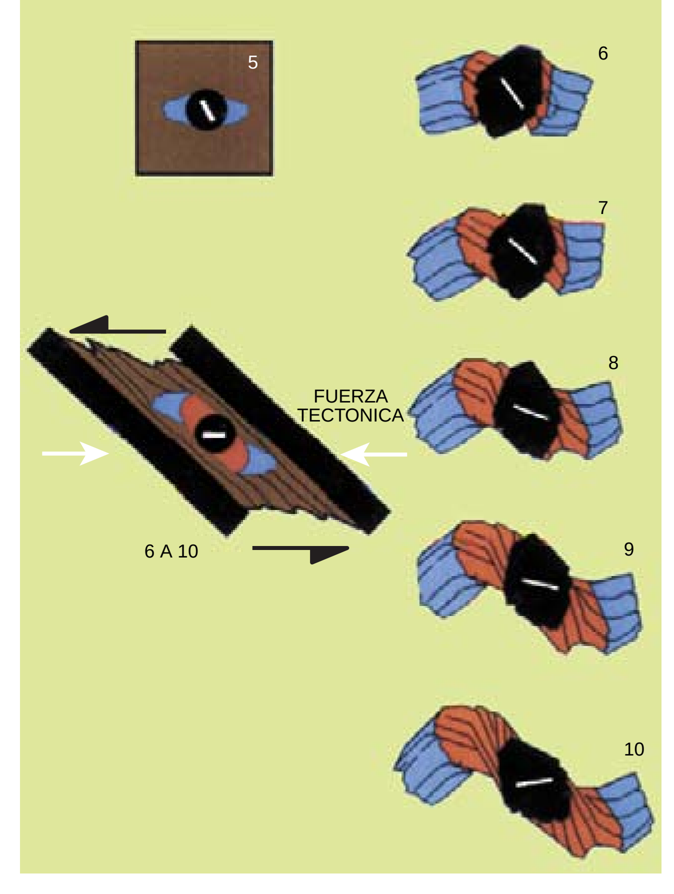
Las dos fotografías nos revelan algunos de los misterios de estos grandes acontecimientos geológicos. Se percibe una innegable impresión de movimiento, evocado por las fibras curvadas y coloreadas insertas sobre los cristales de pirita; cada fibra constituye un cristal muy fino de cuarzo o de calcita. La pirita es un mineral muy duro en comparación con la pizarra donde se halla incrustada, y ello provoca que la roca, al experimentar un estiramiento, se separe de los granos de pirita, creando un vacío que se rellena de líquido. A gran profundidad, estos líquidos cristalizan en fibras, que se van alargando cuanto mayor es el estiramiento de las pizarras, creando las llamadas “sombras de presión”.

Estas fibras son, pues, resultado de una deformación geológica lenta. En la figura de la izquierda la muestra registra dos episodios sucesivos de deformación, con direcciones específicas de las fibras. Se adivina una primera fase de cizalladura con importante influencia de la gravedad, debida al peso de las rocas superiores. Se produjo a continuación un aumento de las fuerzas tectónicas (horizontales) asociado a la colisión de Iberia y Francia. Las fuerzas tectónicas y gravitatorias han hecho girar las piritas al mismo tiempo que los Pirineos avanzaban sobre su antepaís.

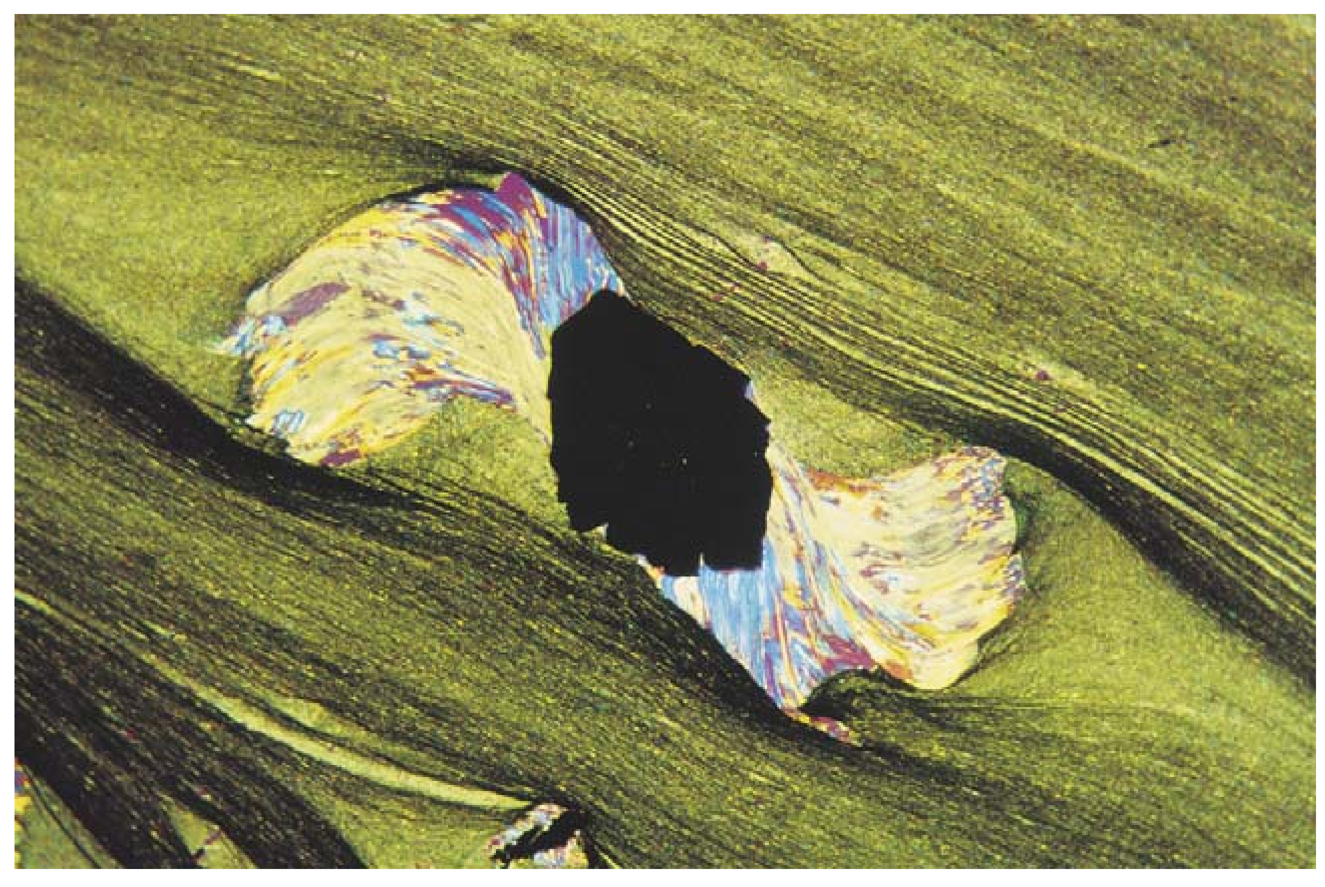


1. Sección vertical transversa de la cadena pirenaica. La muestra *(círculo negro)* se encuentra próxima a una falla cabalgante.

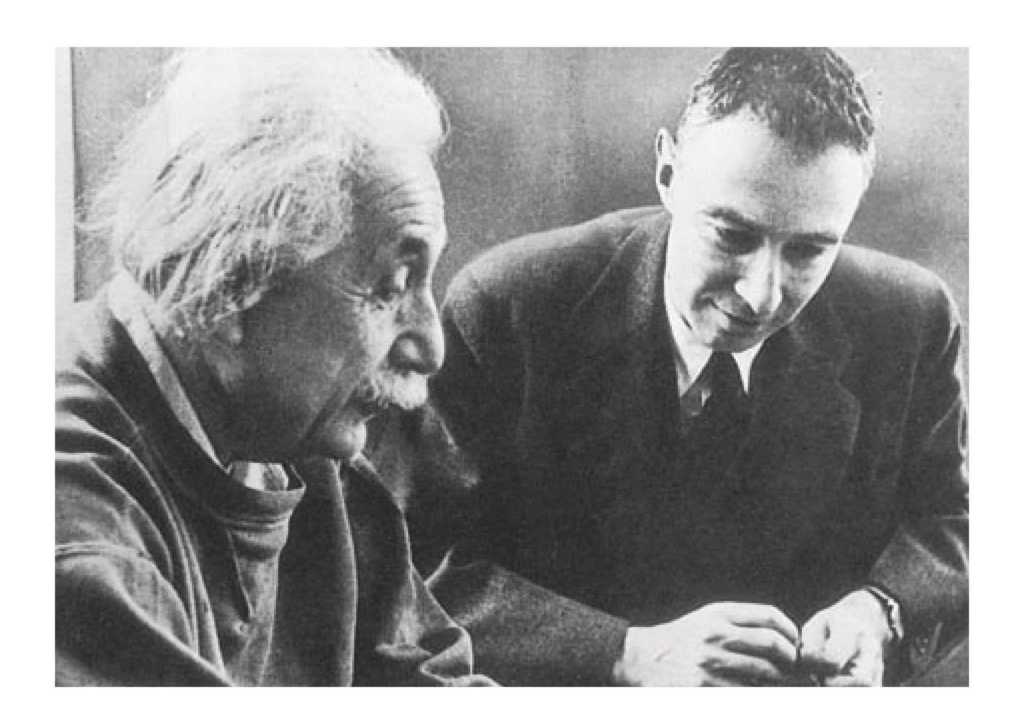




2. Una delgada lámina de una pizarra que contiene gránulos de pirita rodeados de cristalizaciones fibrosas (de cuarzo y de calcita) que resaltan el estiramiento de la roca.



3. Ampliación de un gránulo de pirita, con sus penachos de cristalización.



El padre renuente de los agujeros negros

Las ecuaciones de la gravedad de Albert Einstein constituyen el fundamento de la moderna teoría de los agujeros negros. En ellas se basó él, sin embargo, para intentar demostrar que tales objetos no podían existir

Jeremy Bernstein

La ciencia eminente deja en ocasiones una herencia que desborda no sólo la imaginación, sino también las intenciones de sus creadores. Un ejemplo destacado lo constituyen los primeros pasos de la teoría de los agujeros negros, y muy particularmente el papel que en ellos desempeñó Albert Einstein. En 1939, Einstein publicó en la revista *Annals of Mathematics* un artículo de título descorazonador, "On a Stationary System with Spherical Symmetry Consisting of Many Gravitating Masses" ["Sobre un sistema estacionario con simetría esférica formado por muchas masas gravitatorias"]. En él se proponía demostrar la imposibilidad de los agujeros negros: objetos celestes de tal densidad que su gravedad impide que ni la luz pueda escapar.

Lo paradójico del caso es que en su argumentación Einstein usó su propia teoría general de la relatividad y la gravitación, publicada en 1916, teoría a la que hoy se recurre para deducir que los agujeros negros no sólo son posibles sino el fin inevitable de muchos objetos astronómicos. De hecho, pocos meses después de que apareciera el artículo de Einstein rechazando los agujeros negros, J. Robert Oppenheimer y su alumno Hartland S. Snyder publicaron, sin mencionar ese escrito, un trabajo titulado "On Continual Gravitational Contraction" ["Sobre la contracción gravitatoria continua"]. En el ámbito de la física moderna éste es el primer trabajo que parte de la teoría general de la relatividad de Einstein para explicar el proceso de formación de los agujeros negros.

A FAVOR Y EN CONTRA: En 1939 J. Robert Oppenheimer (*a la derecha*) abogó por la existencia de agujeros negros, al mismo tiempo que Albert Einstein intentaba refutarla. Sus caminos se cruzaron en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, New Jersey, a finales de los años cuarenta (cuando se tomó esta fotografía), pero no sabemos si alguna vez llegaron a hablar de los agujeros negros.

Tal vez más paradójico resulte que la investigación actual sobre agujeros negros, y más en general el estudio de las estrellas en fase de colapso o contracción gravitatoria, se base en un aspecto completamente distinto del legado de Einstein: su descubrimiento de la mecánica cuántica estadística. Sin las predicciones de la estadística cuántica, todos los objetos astronómicos terminarían por contraerse hasta convertirse en agujeros negros, y el resultado sería un universo que no se parecería en nada a éste en que vivimos.

La creación de la estadística cuántica le fue inspirada a Einstein por la carta que recibió en junio de 1924 de un joven físico hindú llamado Satyendra Nath Bose, por entonces desconocido. La carta venía acompañada de un trabajo que una revista científica británica había rechazado. Tras leer el manuscrito, el propio Einstein lo tradujo al alemán e hizo lo necesario para que lo publicara la revista *Zeitschrift für Physik*.

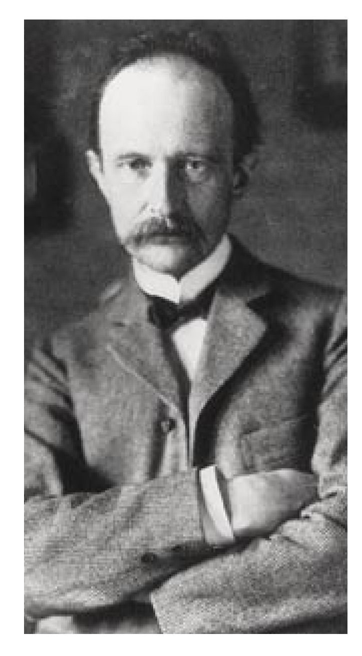
¿Qué indujo a Einstein a ponderar la importancia del manuscrito? Durante veinte años había estado luchando por entender la naturaleza de la radiación electromagnética, en especial la de la radiación atrapada en un recipiente calentado y que alcanza la misma temperatura que sus paredes. Al doblar el siglo, el físico alemán Max Planck había descubierto la función matemática que describe las variaciones en intensidad de las distintas longitudes de ondas, o colores, de esta radiación de cuerpo negro. Resulta que la forma de este espectro no depende del material de las paredes del recipiente. Sólo influye la temperatura de la radiación. (Un ejemplo sorprendente de radiación de cuerpo negro son los fotones residuales de la gran explosión inicial —el "big bang"—, para los cuales el "recipiente" es el universo entero. Recientemente se ha podido determinar que la temperatura de estos fotones es $2{,}726 \pm 0{,}002$ grados kelvin.)

Un poco por casualidad, Bose había expresado la radiación de cuerpo negro en términos de mecánica estadística; vale decir, había obtenido la ley de Planck a partir de un planteamiento matemático mecánico-cuántico. Este resultado llamó la atención de Einstein. Y, propio de su talante, profundizó en la cuestión. Einstein empleó el mismo método para estudiar la mecánica estadística de un gas de moléculas dotadas de masa que obedecen el mismo tipo de leyes que Bose había utilizado para los fotones. Al derivar una ley análoga a la de Planck para este caso, Einstein observó algo extraordinario. Si se enfría un gas de partículas que obedecen la estadística de Bose-Einstein, entonces, a una temperatura crítica determinada, todas las moléculas se acumulan de repente en un estado único o "degenerado". Se trata de lo que ahora conocemos por condensación de Bose-Einstein (aunque el primero no tuvo nada que ver en su formulación).

Un ejemplo interesante es el de un gas de helio 4, un isótopo común cuyo núcleo consta de dos protones y dos neutrones. A la temperatura de 2,18 kelvin el gas se convierte en líquido con las propiedades más misteriosas que se puedan imaginar, incluida la de fluir sin rozamiento (superfluidez). A lo largo del último año científicos estadounidenses han culminado con éxito la difícil tarea de enfriar otras clases de átomos a milmillonésimas de un grado kelvin para conseguir un condensado de Bose-Einstein.

Sin embargo no todas las partículas de la naturaleza manifiestan esta con-

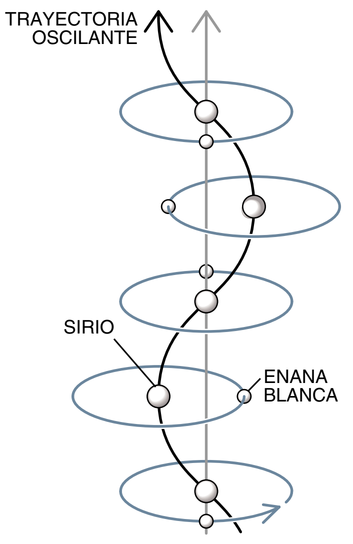
El principio de la historia de los agujeros negros



1900
Max Planck descubre la radiación de cuerpo negro.



1905
En un artículo sobre la radiación de cuerpo negro, **Albert Einstein** demuestra que la luz se puede considerar formada por partículas (fotones).



1915
Por medio de estudios de espectroscopía, el astrónomo Walter S. Adams identifica la tenue compañera de Sirio (que provoca la ligera oscilación que sufre éste en su trayectoria) como una estrella pequeña, caliente y densa: una enana blanca.



1916
Einstein publica su teoría general de la relatividad, con ecuaciones que describen la gravedad.

densación. En 1925, inmediatamente después de que Einstein publicara sus artículos sobre la condensación, Wolfgang Pauli identificó una segunda clase de partículas (que incluye el electrón, el protón y el neutrón) portadoras de propiedades distintas. Pauli descubrió que dos partículas idénticas de esta clase —dos electrones, por ejemplo— nunca pueden coincidir en el mismo estado mecánico-cuántico: el principio de exclusión de Pauli. En 1926, Enrico Fermi y Paul Dirac introdujeron la estadística cuántica de estas partículas, presentándola como análoga a la estadística de Bose-Einstein.

En virtud del principio de exclusión de Pauli, lo último que estas partículas quisieran sería condensarse a bajas temperaturas; la verdad es que evidencian la tendencia opuesta. Si se comprime un gas de electrones, enfriándolo a una temperatura muy baja y disminuyendo su volumen, los electrones se ven obligados a invadir los espacios de otros electrones. Pero eso lo prohíbe el principio de Pauli; por tanto, los electrones se alejan unos de otros a velocidades que pueden acercarse a la lumínica. En el caso de electrones y demás partículas de Pauli, la presión creada por estas partículas que escapan —la "presión de degeneración"— persiste, aun cuando el gas se enfríe hasta el cero absoluto. Eso no tiene nada que ver con la mutua repulsión eléctrica entre electrones. Los neutrones, que carecen de carga, hacen lo mismo. Es pura física cuántica.

Pero, ¿qué tiene que ver la estadística cuántica con las estrellas? En las postrimerías del siglo pasado, los astrónomos habían empezado a identificar una clase peculiar de estrellas pequeñas y mortecinas: las enanas blancas. La que acompaña a la estrella más brillante del cielo, Sirio, tiene la masa del Sol pero emite alrededor de 1/360 de su luz. Dados su masa y su tamaño, las enanas blancas deben ser enormemente densas. La densidad de la compañera de Sirio multiplica por 61.000 la del agua. ¿Qué son estos objetos tan extraños? Sir Arthur Eddington entra en escena.

Cuando yo empezaba a estudiar física, a finales de los años cuarenta, Eddington era uno de mis héroes. Eddington, que murió en 1944, era un neokantiano convencido de que todo lo importante acerca del universo se puede descubrir examinando lo que ocurre dentro de la propia cabeza. Pero desde los últimos años de la década de 1910, cuando Eddington dirigió una de las dos expediciones que confirmaron la predicción de Einstein de que el Sol desvía la luz estelar, hasta los últimos años de la década de los treinta, cuando realmente empezó a perder el control de sus actos, Eddington fue en verdad uno de los gigantes de la ciencia del siglo XX. Fue el creador de la disciplina que permitió entender la constitución interna de las estrellas, título de su libro clásico de 1926. Para Eddington las enanas blancas eran una afrenta, por lo menos desde un punto de visto estético. Sin embargo, las estudió y se le ocurrió una idea liberadora.

En 1924 propuso que la presión gravitatoria que exprimía a la enana podía despojar algunos protones de sus electrones. En este caso los átomos perderían las "lindes", y podrían congregarse hasta formar un paquete pequeño y denso. Con el tiempo, la contracción gravitatoria de la enana blanca se detendría a causa de la presión de degeneración de Fermi-Dirac, esto es, cuando el principio de exclusión de Pauli obligara a la mutua separación entre electrones.

Se dio un paso más en la comprensión de las enanas blancas en julio de 1930, cuando Subrahmanyan Chandrasekhar, a la sazón de 19 años, viajaba de Madrás a Southampton. R. H. Fowler había acep-



1916
Karl Schwarzschild demuestra que para un objeto en fase de contracción existe un radio en el cual las ecuaciones de la gravedad de Einstein se hacen "singulares": el tiempo se anula y el espacio se hace infinito.



1924
Einstein publica el trabajo de **Satyendra Nath Bose** sobre la radiación de cuerpo negro en el que desarrolla la estadística cuántica de una clase de partículas (como los fotones).



1924
Sir Arthur Eddington sugiere que, en una enana blanca, la gravedad puede arrancarle electrones a los protones.



1925
Wolfgang Pauli enuncia el principio de exclusión, que afirma que ciertas partículas no pueden hallarse exactamente en el mismo estado cuántico.

tado que Chandrasekhar acudiera a estudiar con él en la Universidad de Cambridge (donde también se encontraba Eddington). Después de leer el libro de Eddington sobre las estrellas y el de Fowler sobre la mecánica cuántica estadística, el muchacho se sintió fascinado por las enanas blancas. A modo de pasatiempo durante la travesía, se entretuvo en la pregunta que se formuló: ¿Existe un límite superior para la masa de una enana blanca antes de que entre en colapso bajo su propia fuerza de gravitación? Su respuesta desató una revolución.

Considerada en su globalidad, la enana blanca es eléctricamente neutra. Significa ello que cada electrón debe tener su correspondiente protón, dotado de una masa unas 2000 veces mayor. En consecuencia, los protones han de aportar la mayor parte de la compresión gravitatoria. Si la enana no está en fase de contracción, la presión de degeneración de los electrones debe equilibrarse con la contracción gravitatoria de los protones. Resulta que este equilibrio limita el número de protones y, por tanto, la masa de la enana. Este máximo, conocido por límite de Chandrasekhar, es aproximadamente igual a 1,4 veces la masa solar. Las enanas con una masa mayor no pueden ser estables.

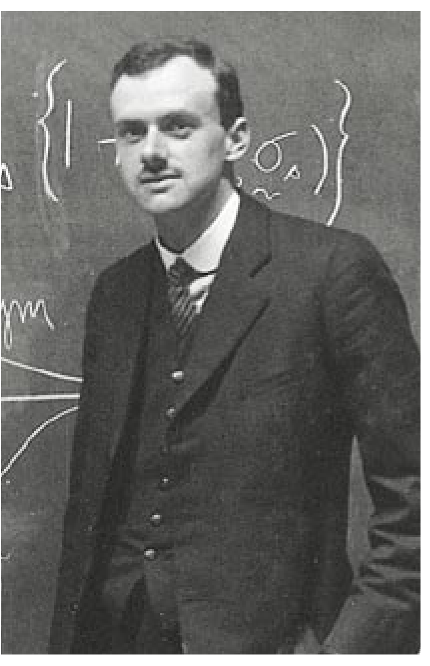
El resultado de Chandrasekhar inquietó profundamente a Eddington. ¿Qué ocurriría si la masa fuera mayor que 1,4 veces la solar? La respuesta no le gustaba. Salvo que fuera posible encontrar algún mecanismo que limitara la masa de las estrellas que terminan por autocomprimirse en una enana, o a menos que el resultado de Chandrasekhar fuera incorrecto, las estrellas dotadas de gran masa estaban condenadas a contraerse gravitatoriamente hasta desaparecer.

Eddington juzgó intolerable semejante conclusión y procedió a atacar, en público y en privado, el uso que Chandrasekhar había hecho de la estadística cuántica. La crítica hizo mella en Chandrasekhar. Pero, contando con el apoyo entre otros de Niels Bohr, que le aseguró que Eddington estaba equivocado y debía ignorarle, Chandrasekhar no cedió.

Mientras algunos físicos estudiaban la estadística cuántica y las enanas blancas, otros desarrollaron la contribución de Einstein a la gravitación, su teoría general de la relatividad. Por lo que yo sé, Einstein nunca dedicó mucho tiempo a la determinación de soluciones exactas de sus ecuaciones gravitatorias. La parte de su trabajo que describe la gravedad en torno a la materia reviste una extraordinaria complejidad porque la gravedad distorsiona la geometría del espacio y el tiempo, y hace que las partículas se muevan de un punto a otro a lo largo de una curva. Más importante aún era para Einstein que la fuente de la gravedad —la materia— no podía describirse sólo con ecuaciones gravitatorias. Tenía que añadirse “a mano”, lo que le movía a pensar que las ecuaciones eran incompletas. Con todo, las soluciones aproximadas de las mismas describían con precisión suficiente la desviación de la luz estelar y otros fenómenos. No por ello quedó Einstein menos impresionado cuando, en 1916, apareció Karl Schwarzschild con una solución exacta para una situación realista: el caso de un planeta que gira alrededor de una estrella.

Schwarzschild había encontrado en el camino algo inquietante: a una determinada distancia del centro de la estrella las matemáticas empezaban a disparatar. A esta distancia, que denominamos radio de Schwarzschild, el tiempo se anula y el espacio se hace infinito. La ecuación presenta lo que los matemáticos llaman una singularidad. Normalmente el radio de Schwarzschild es mucho menor que el radio del objeto. Para el Sol, por ejemplo, es tres kilómetros, mientras





1926
Enrico Fermi y **P.A.M. Dirac** desarrollan la estadística cuántica para partículas que obedecen el principio de exclusión de Pauli (como los electrones y los protones). Al comprimirlas, estas partículas se alejan mutuamente creando la presión de degeneración.

1930
Sirviéndose de la estadística cuántica y el trabajo de Eddington sobre estrellas, **Subrahmanyan Chandrasekhar** descubre que el límite superior para la masa de las enanas blancas es 1,4 veces la masa solar. Sugería así que las estrellas mayores se contraen hasta desaparecer. Eddington lo criticó.

que para una canica de un gramo es 10^{-28}.

Schwarzschild era consciente, por supuesto, de que su fórmula carecía de sentido a esta distancia, y decidió que eso no importaba. Diseñó el modelo simplificado de una estrella en el que demostró que sería necesario un gradiente infinito de presión para comprimirla hasta su radio. El resultado, concluía, carecía de interés práctico.

El análisis de Schwarzschild no satisfizo a todos. A Einstein le inquietaba que el modelo de estrella de Schwarzschild no cumpliera algunos requisitos técnicos de la teoría de la relatividad. Sin embargo, otros autores mostraron que era posible reescribir las soluciones de Schwarzschild y evitar así la singularidad. Pero, ¿no constituía realmente el resultado una singularidad? Sería inexacto afirmar que aquí se levantó un acalorado debate: la mayoría de los físicos andaban poco interesados por estas cuestiones, por lo menos hasta 1939.

En el trabajo de 1939, Einstein atribuía su interés renovado por el radio de Schwarzschild a discusiones con el cosmólogo de Princeton Harold P. Robertson y con su adjunto Peter G. Bergmann, profesor emérito hoy en la Universidad de Syracuse. En ese artículo Einstein se proponía acabar de una vez por todas con la singularidad de Schwarzschild. Así concluía: “El resultado esencial de esta investigación es entender claramente por qué las ‘singularidades de Schwarzschild’ no existen en la realidad física.” En otras palabras, los agujeros negros no pueden existir.

Para demostrar su tesis, Einstein estudió un grupo de pequeñas partículas que giraban en órbitas circulares bajo la mutua influencia de la gravitación —de hecho, un sistema parecido a un cúmulo estelar esférico. Se preguntó si un sistema así podría contraerse por la propia gravedad y formar una estrella estable de radio igual a su radio de Schwarzschild. Y llegó a la conclusión de que esto no podía ocurrir porque con un radio ligeramente mayor las estrellas del cúmulo tendrían que moverse a una velocidad superior a la de la luz para que la configuración fuera estable. Aunque el razonamiento de Einstein es correcto, no es pertinente: da igual que una estrella en fase de contracción sea inestable con el radio de Schwarzschild, porque la estrella se contrae hasta un radio más pequeño en cualquier caso. Me impresionó mucho el hecho de que a sus 60 años Einstein presentara en este artículo tablas de resultados numéricos que debía haber obtenido con una regla de cálculo. El artículo, como la regla de cálculo, es hoy un artilugio histórico.

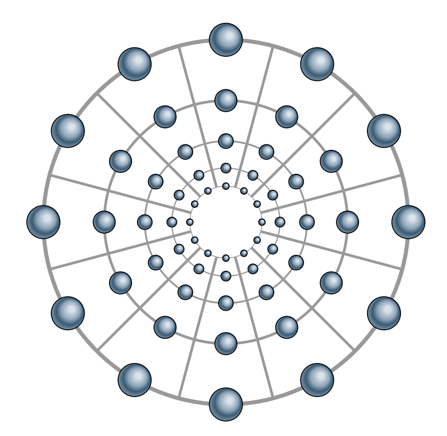
Mientras Einstein trabajaba en esta línea, algo completamente distinto se cocía en California, donde Oppenheimer y sus discípulos estaban creando la teoría moderna de los agujeros negros. Lo que llama la atención, a propósito de la investigación de los agujeros negros, es la idea en que se inspiró, que luego resultó completamente falsa. En 1932 James Chadwick halló el neutrón, componente neutro del núcleo atómico. Pronto se empezó a especular —sobre todo por parte de Fritz Zwicky, del Instituto de Tecnología de California, y por Lev D. Landau, un brillante físico teórico soviético— que los neutrones podían proporcionar una solución alternativa a las enanas blancas.

Según su razonamiento, cuando la presión gravitatoria fuera suficientemente grande un electrón estelar

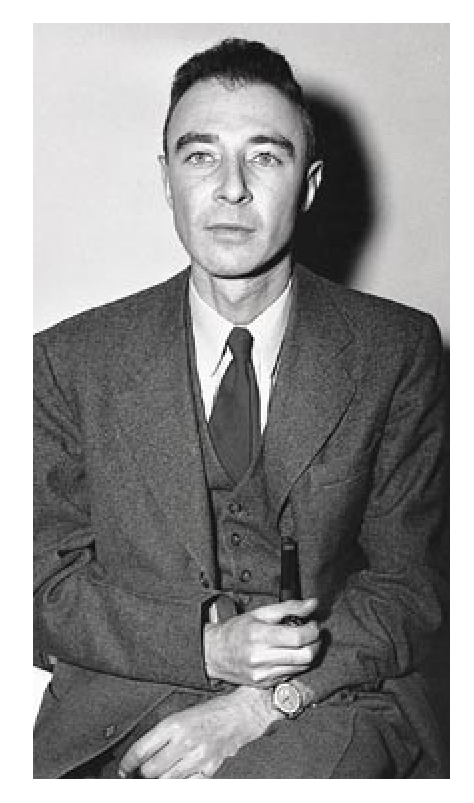


1932
James Chadwick descubre el neutrón. Su existencia conduce a los investigadores a preguntarse si las “estrellas de neutrones” podrían constituir una posibilidad alternativa a las enanas blancas.

“Sobre un sistema estacionario con simetría esférica formado por muchas masas gravitatorias” [“On a Stationary System with Spherical Symmetry Consisting of Many Gravitating Masses”]
—Einstein en Annals of Mathematics *(1939)*



1939
Conversaciones con colegas mueven a Einstein a intentar terminar de una vez por todas con el radio de Schwarzschild: en un artículo publicado en *Annals of Mathematics*, Einstein concluye que los agujeros negros son imposibles.



1939
A partir de la teoría de las estrellas de neutrones en fase de contracción y de las enanas blancas, **J. Robert Oppenheimer** y su alumno Hartland S. Snyder explican el proceso de formación de un agujero negro.

podía reaccionar con un protón para producir un neutrón. (Zwicky incluso conjeturó que este proceso se daba en las explosiones de supernovas; estaba en lo cierto, y ahora identificamos estas “estrellas de neutrones” como púlsares.) En aquel momento, se desconocía el mecanismo real que genera la energía de las estrellas ordinarias. Una solución consistía en imaginar una estrella de neutrones en el centro de las estrellas ordinarias, más o menos de la misma manera que muchos astrofísicos conjeturan hoy que los agujeros negros alimentan cuásares.

Entonces se planteó la cuestión: ¿cuál es, para estas estrellas, el equivalente del límite de masa de Chandrasekhar? Calcular este valor resulta mucho más difícil que hallar el límite para las enanas blancas. La razón estriba en que los neutrones interaccionan entre sí con una fuerza nuclear (o fuerte) cuyas propiedades específicas todavía no acabamos de entender. La gravedad termina por superar esta fuerza, pero el valor exacto de la masa límite depende de detalles que no sabemos precisar. Oppenheimer publicó dos artículos sobre este tema con sus alumnos Robert Serber y George M. Volkoff, y concluyó que la masa límite aquí es comparable con el límite de Chandrasekhar para las enanas blancas. El primero de estos artículos apareció en 1938 y el segundo en 1939. (La fuente real de energía estelar —la fusión— fue descubierta en 1938 por Hans Bethe y Carl Friedrich von Weizsäcker, pero pasaron unos años antes de que se aceptara, y los astrofísicos continuaron trabajando en otras teorías posibles.)

Oppenheimer volvió entonces a preguntarse lo mismo que Eddington se había cuestionado acerca de las estrellas blancas: ¿qué ocurriría con una estrella en fase de contracción gravitatoria cuya masa excediera cualquiera de los límites? El rechazo de los agujeros negros por parte de Einstein en 1939 —que Oppenheimer y sus alumnos ignoraban, pues estaban trabajando a unos 5000 kilómetros de distancia— era irrelevante. Oppenheimer, que no pretendía construir una estrella estable de radio igual a su radio de Schwarzschild, quería saber qué ocurriría cuando una estrella se contrajera más allá de su radio de Schwarzschild. Encargó el estudio detallado de este problema a Snyder.

Para simplificar el asunto, Oppenheimer sugirió a Snyder que hiciera ciertas hipótesis y que omitiera la presión de degeneración, la posible rotación de la estrella y otras consideraciones técnicas similares. La intuición le decía a Oppenheimer que estos factores no influyen en lo esencial. (Estas hipótesis fueron cuestionadas muchos años más tarde por una nueva generación de investigadores que disponían de refinadas computadoras de alta velocidad —el pobre Snyder disponía de una anticuada calculadora mecánica de sobremesa—, pero Oppenheimer tenía razón. No influyen en nada esencial.) Con estas hipótesis simplificadas, Snyder descubrió que lo que le ocurre a una estrella en fase de contracción depende sorprendentemente de la atalaya en que se instale el observador.

Consideremos en primer lugar un observador en reposo a una distancia segura de la estrella. Supongamos también que otro observador está situado en la superficie de la estrella —moviéndose conjuntamente con su contracción— y puede enviar señales luminosas a su colega en reposo. El observador en reposo verá que las señales que le manda el observador en movimiento se desplazan gradualmente hacia el extremo rojo del espectro electromagnético. Si la frecuencia de las señales la interpretáramos como un reloj, el observador en reposo concluiría que el reloj del observador en movimiento se está retrasando gradualmente.

Y al llegar al radio de Schwarzschild el reloj se pararía del todo. El observador en reposo deduciría que la estrella necesita un tiempo infinito para contraerse hasta alcanzar el radio de Schwarzschild. No podemos hablar de lo que ocurre después porque, según el observador en reposo, no hay un “después”. En lo que concierne a este observador, la estrella se congela en su radio de Schwarzschild.

De hecho, hasta el mes de diciembre de 1967, cuando John A. Wheeler, hoy en la Universidad de Princeton, acuñó en una conferencia la expresión “agujero negro”, era frecuente que la bibliografía científica denominara a estos objetos estrellas congeladas. Este estado congelado es el significado real de la singularidad de la geometría de Schwarzschild. Como Oppenheimer y Snyder señalaron en su trabajo, la estrella en contracción “tiende a encerrarse en sí misma y a cortar toda comunicación con un observador lejano; sólo queda su campo gravitatorio.” En otras palabras, se ha formado un agujero negro.

Pero, ¿qué hay de los observadores montados en estrellas en fase de contracción? Estos observadores, subrayaron Oppenheimer y Snyder, ven las cosas de un modo distinto. Para ellos el radio de Schwarzschild no significa nada especial. Lo atraviesan y llegan al centro de la estrella en cuestión de horas, según marcan sus relojes. Sin embargo, padecerían un “oleaje” gravitatorio de intensidad monstruosa que los destrozaría.

Esto ocurría en el año 1939, y nuestro propio mundo estaba a punto de saltar en añicos. Poco después Oppenheimer participaría en la guerra, construyendo el arma más destructiva que la humanidad jamás había imaginado. Nunca más volvió a ocuparse de los agujeros negros. Por lo que sé, Einstein tampoco lo hizo. Después de la guerra, en 1947, Oppenheimer ocupó la dirección del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, donde Einstein seguía de profesor. Conversaban de vez en cuando. Nada indica que nunca lo hicieran sobre los agujeros negros. Hasta los años sesenta no se producirían nuevos avances, cuando el descubrimiento de cuásares, púlsares y fuentes compactas de rayos X dio nueva vida al teorizar sobre el sino misterioso de las estrellas.

JEREMY BERNSTEIN es profesor emérito de física del Instituto Stevens de Tecnología, profesor asociado de la Universidad Rockfeller y uno de los vicepresidentes del Consejo de Administración del Centro Aspen de Física. Este artículo es una adaptación de uno de los textos que bajo el título *A Theory for Everything* publicará este mes de agosto en Copernicus (Springer Verlag).

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SUBTLE IS THE LORD: THE SCIENCE AND THE LIFE OF ALBERT EINSTEIN. Abraham Pais. Oxford University Press, 1982.

DARK STARS: THE EVOLUTION OF AN IDEA. Werner Israel en *300 Years of Gravitation*. Dirigido por S. W. Hawking y W. Israel. Cambridge University Press, 1987.

CHANDRA: A BIOGRAPHY OF S. CHANDRASEKHAR. Kameshwar C. Wali. University of Chicago Press, 1991.

BLACK HOLES. J.-P. Luminet et al. Cambridge University Press, 1992.

BLACK HOLES AND TIME WARPS. Kip Thorne. W. W. Norton, 1994.

El arte pictórico de Charles R. Knight

Los murales y representaciones artísticas realizadas por Knight infundieron vida a los dinosaurios en la ciencia y en la imaginación popular

Gregory S. Paul



Durante la primera mitad de nuestro siglo, creyeron los paleontólogos que los dinosaurios eran reptiles de cerebro diminuto que arrastraban una pesada cola, seres reacios a la grupalización y despreocupados de la progenie. Desde hace algunos años, los investigadores han ido viendo con creciente claridad que muchos de los dinosaurios sí actuaban en grupo. Pero la concepción primitiva, a la que Stephen Jay Gould ha denominado "consenso moderno", se ha mantenido vigente durante bastantes decenios. Aunque la responsabilidad por tal tendencia recae sobre los paleontólogos, fue el pintor y escultor estadounidense Charles R. Knight (1874-1953) quien la popularizó. Los murales que realizó condicionaron la forma de imaginar la vida prehistórica no sólo durante su carrera profesional —que se extendió desde principios de siglo hasta los años cuarenta— sino también varios decenios tras su muerte. Los ilustradores de dinosaurios de la generación actual, y quien escribe, crecimos y nos formamos en la admiración de sus plasmaciones.

En gran medida, la influencia de Knight perdura debido a que era tan excelente pintor como naturalista, dotado de un profundo conocimiento de la anatomía. Knight tenía la facultad de aplicar su vasto saber anatómico para lograr



ENEMIGOS MORTALES.
Un *Triceratops* astado y un *Tyrannosaurios*, alzado como una torre, vense enfrentados en el mural de Charles R. Knight que más influencia ha ejercido (*abajo*). Lo pintó a finales de los años veinte. Ilustraciones como éstas siguen definiendo normas de alta calidad en las representaciones paleontológicas. Knight, que se apoyaba en sus vastos conocimientos anatómicos y en su vívida imaginación, creó muchas y detalladas imágenes de animales prehistóricos. Por ejemplo, el modelo de *Stegosaurus* preparado por él en 1899 (*fotografía de la derecha*) posee demasiadas placas dorsales según las concepciones actuales, pero las lleva en la disposición alternante hoy considerada correcta.

que los seres prehistóricos cobraran vida. Sus pinturas siguen exhibiéndose en los principales museos de historia natural, como el Field de Chicago, el del Condado de Los Angeles y el Americano de Nueva York.

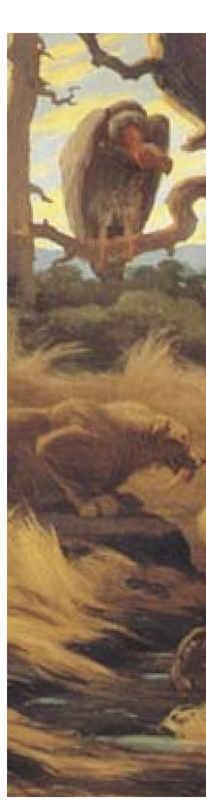
Las primeras descripciones publicadas de fósiles que hoy se cree que correspondían a un dinosaurio aparecieron en 1824. A lo largo de todo el siglo XIX, se desenterraron muchísimos dientes y huesos en excavaciones efectuadas en Europa y en los Estados Unidos. Tales hallazgos despertaron el interés de la gente por conocer cómo eran aquellos gigantes desaparecidos hacía tan largo tiempo. Pero la mezcolanza de esqueletos que los cazadores de fósiles descubrían tan sólo ofrecían información esquemática a los artistas que trataban de recrear aquellos animales prehistóricos. El esfuerzo más notorio por satisfacer la curiosidad de la sociedad se debió a Richard Owen, preeminente paleontólogo que acuñó el término “Dinosauria” en 1841. En 1854 Owen encargó esculturas de dinosaurios a tamaño natural —que todavía siguen allí— para los jardines del Palacio de Cristal londinense.

El único esqueleto completo desenterrado antes de 1880 procedía de Alemania: tratábase de un animal pequeño, carnívoro y parecido a un ave, un *Compsognathus*. La situación

mejoró de forma impresionante de 1870 a 1890, al empezar los científicos a excavar en sedimentos ricos en dinosaurios ubicados en los territorios áridos del oeste de los Estados Unidos. Allí descubrieron esqueletos completos de saurópodos, de allosaurios depredadores y de estegosaurios acorazados pertenecientes al período jurásico. Los conocimientos sobre la forma y el tamaño de los dinosaurios empezaron a acumularse. Poco después, en el último decenio del siglo, Knight los pintaba.

De talento precoz, a los cinco o seis años dibujaba ya paisajes y animales. Knight era muy miope. Por si fuera poco, una grave lesión del ojo derecho, sufrida en la infancia, todavía le hizo perder más vista. A pesar de todo, animado por las personas mayores que le rodea-





LOS POZOS BITUMINOSOS EN RANCHO LA BREA, en California, fueron pintados por Knight en los años veinte, tres lustros después de su excavación en 1906. El yacimiento proporcionó vasto número de fósiles de la edad de Hielo, entre ellos, tigres de dientes de sable, leones de las cavernas, elefantes, mastodontes, perezosos, camellos, caballos, coyotes, bisontes, antílopes y aves. En las ilustraciones de mamíferos, a diferencia de sus dibujos de dinosaurios, Knight ofrecía mucho movimiento. Por ello, los montajes esqueléticos de mamíferos que figuraban en conjunción con los murales de Knight, como los perezosos del Museo Americano de Historia Natural de Nueva York (*fotografía*), adoptaban poses animadas.



GREGORY S. PAUL, que se formó en la Universidad Johns Hopkins, ha publicado sus trabajos pictóricos en *Nature*, *Smithsonian* y *Science News*.

ban, entre ellas, su madrastra, amante de las artes, y un amigo de la familia dotado de gran ingenio, conforme fue creciendo, Knight asistió a una serie de escuelas de arte de la ciudad de Nueva York y sus alrededores. A los 16 años consiguió su primer y único empleo a tiempo completo, consistente en pintar escenas de naturaleza para la decoración de iglesias.

Muy poco después se trasladó de Brooklyn —alejándose de su madrastra, cada vez más celosa— a Manhattan. Pronto inició una carrera de ilustrador independiente para varias publicaciones de historia natural. Disfrutaba visitando los parques y los zoológicos de la ciudad, visitas que reseñaba realizando gran número de meticulosos bocetos de animales, plantas y otros objetos. Tal ejercicio potenció su trabajo, al igual que su costumbre de visitar el Museo Americano de Historia Natural. En su sala de disección afinó sus conocimientos anatómicos. También fue en ese centro donde Knight dio con su vocación, cuando uno de los paleontólogos del museo le pidió como favor personal que crease una reproducción de un mamífero extinto.

Tras un prolongado viaje por Europa, durante el cual estudió arte y visitó todavía más zoológicos, Knight centró su atención casi exclusivamente en los dinosaurios. Estuvo trabajando un breve período bajo la dirección de Edward Drinker Cope, justo antes de la muerte de este renombrado paleontólogo. Cope y su rival, Othniel C. Marsh, de Yale, habían suscitado en los Estados Unidos la primera de las grandes oleadas de interés por los dinosaurios en los años setenta.

DINOSAURIOS DE PICO ESPATULADO del género *Anatosaurus*, con su característico pico de pato, pintados por Knight en 1909. Basó éste su composición en dos esqueletos montados en el Museo Americano de Historia Natural. Hoy, en las salas de dinosaurios de este museo, recientemente renovadas, podemos ver juntos los montajes y la pintura de Knight.

Pero Knight volvió a establecer su asociación más importante en el Museo Americano de Historia Natural, en colaboración con el paleontólogo Henry Fairfield Osborn. Osborn, director del museo, quería que sus colecciones de huesos resecos se tradujeran a imágenes vívidas y cautivadoras. Tales imágenes, pensó, podrían atraer a multitudes y hacer de su museo la institución puntera de las ciencias naturales.

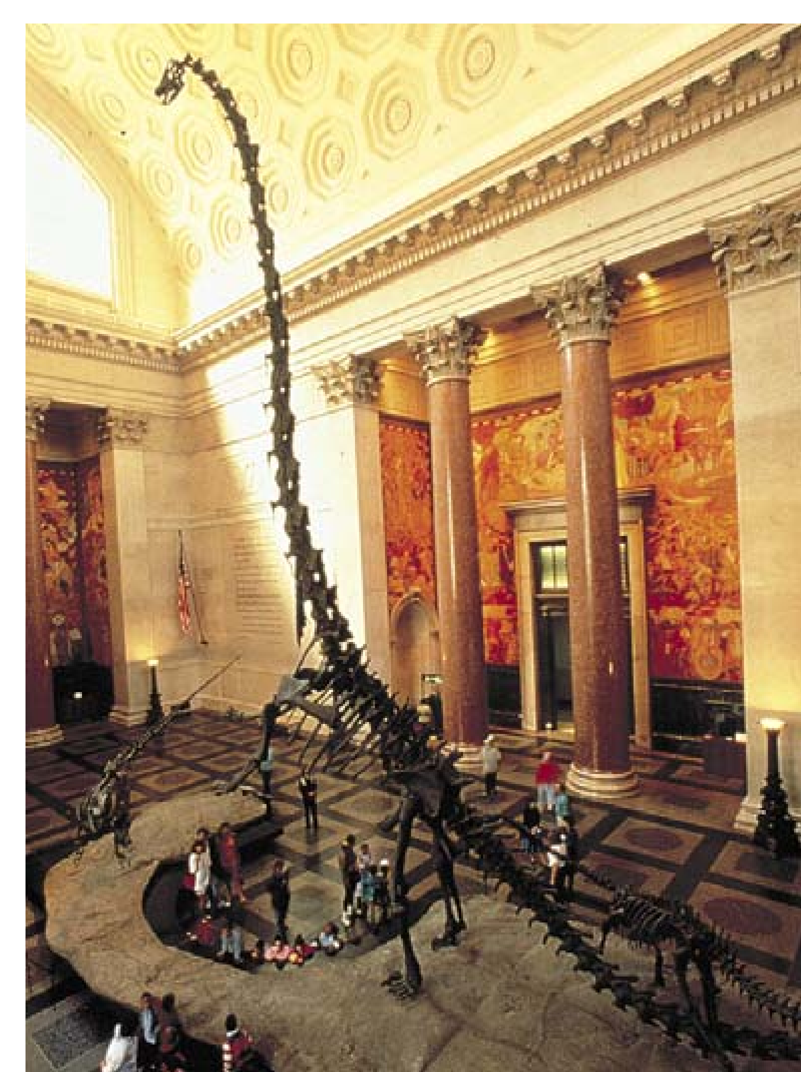
Knight consiguió rápidamente atención para el museo y para sí mismo, plasmando restauraciones donde se reflejaban muchas de las primeras ideas de Osborn. Proponía éste, por ejemplo, que los saurópodos podrían haber sido criaturas terrestres, ramoneadores de las copas de los árboles. Así, bajo la dirección de Osborn, Knight pintó un saurópodo (un brontosaurio) alzado sobre sus patas traseras como a la busca de follaje. Knight ilustró también grandes terópodos —los dinosaurios depredadores de mayor éxito— saltando por el aire. Aunque atinaba al caracterizar a estos terópodos, mostrándolos como ágiles cazadores, la mayoría de los paleontólogos de su época rechazaron tal idea.

Durante los comienzos del siglo XX, las excavaciones efectuadas en Norteamérica y en Asia proporcionaron restos de dinosaurios notables pertenecientes al Cretácico tardío, entre ellos, terribles tiranosaurios, ceratópsidos astados, hadrosaurios de pico espatulado y anquilosaurios acorazados. Las pinturas de Knight correspondientes a esta época, consistentes, sobre todo, en murales para los museos Americano y Field, fueron obras de arte sumamente elaboradas. Debido, en parte, a la pobreza de su visión a distancia, solía pintar escenas neblinosas, repletas de figuras minuciosamente representadas y realistas en grado sumo de dinosaurios conocidos. Fueron éstos los años de mayor creatividad y sus ilustraciones llegaron a ser las más famosas del mundo.

También la vida personal de Knight alcanzó el cenit durante los años veinte. El y su esposa, Annie Hardcastle, formaban una pareja popular en la vida social de Nueva York. Annie se aseguró una vida cómoda para ambos, gestionando todos los asuntos financieros de Knight, desde el dinero para sus gastos hasta sus honorarios a percibir por sus trabajos (pues él era notablemente descuidado en asuntos pecuniarios). La hija de ambos, Lucy, se encargó de tales asuntos a la edad de 13 años. Siete años más tarde lograba conseguir 150.000 dólares del museo Field por los murales que su padre exhibía allí. En los años treinta Knight aumentó sus ingresos dando conferencias. En la actualidad, la restauración de dinosaurios constituye por sí sola una pequeña industria, ejercida en todo el mundo.

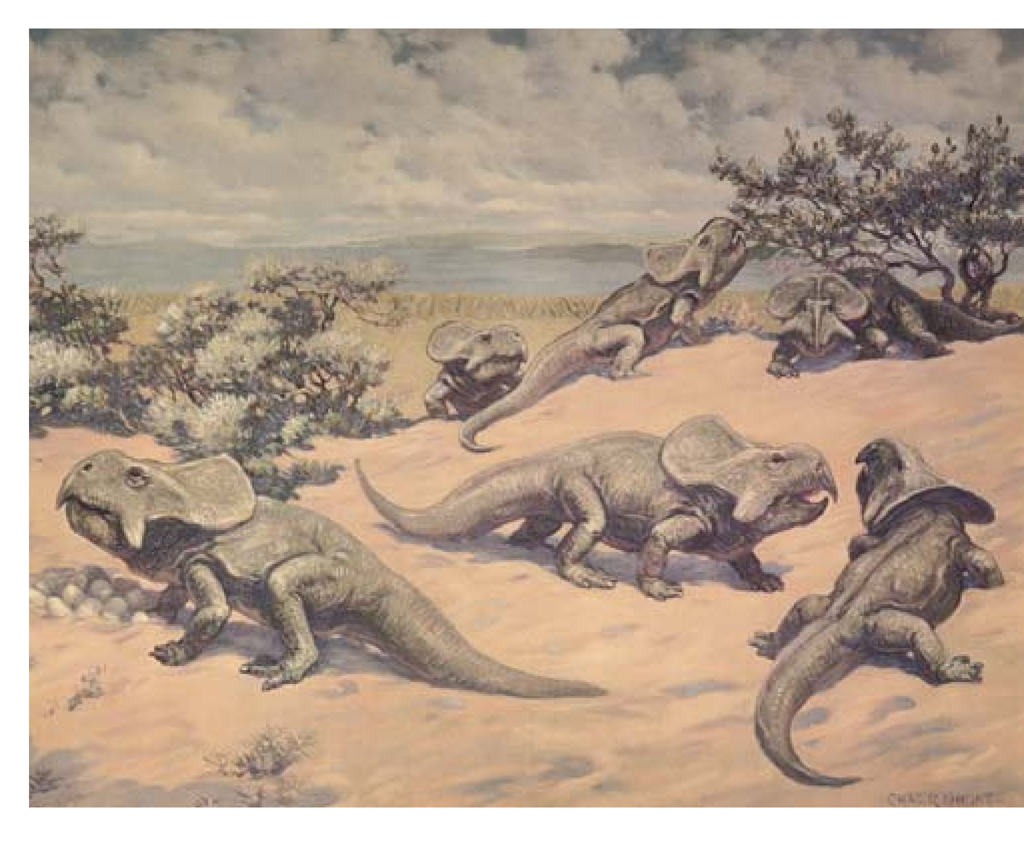
Knight trabajaba en estrecha colaboración con paleontólogos. En consecuencia, su arte refleja el dogmatismo científico de su tiempo. Dogmatismo, empero, que no era en modo alguno absoluto. Por ejemplo, en *Life through the Ages*, un catálogo de dinosaurios que Knight compiló en 1946, se decía de los dinosaurios que eran “inadaptables e incapaces de evolucionar” y





ESTE SAUROPODO alzado sobre las patas traseras, que Knight pintó en los comienzos de su carrera, hacia la vuelta del siglo, estuvo influido por una de las teorías de Henry Fairfield Osborn, a saber, que tales dinosaurios pudieron ser terrestres y ramoneadores de las copas arbóreas (*pintura*). Casi todos los paleontólogos de la época rechazaron tal idea; a pesar de ello, el célebre barosaurio instalado en 1991 en la sala de acceso del Museo Americano de Historia Natural para saludar a los visitantes ha sido montado en esa misma posición (*fotografía*).

CARNIVOROS EN LUCHA del género *Dryptosaurus*, mostrados aquí atendiendo a la descripción de Edward Drinker Cope. Knight terminó este trabajo en 1897, poco después de la muerte de Cope. En el intervalo de un decenio, la mayoría de los paleontólogos rechazaban la idea de que tales dinosaurios fuesen capaces de brincar. En la actualidad, algunos científicos opinan que tales terópodos pudieron perfectamente haber sido depredadores muy agresivos.



***PROTOCERATOPS* PEQUEÑOS, pintados por Knight en 1922, al poco de ser descubiertos en Mongolia los primeros nidos de dinosaurios. Knight, por sugerencia de Osborn, presentó a los dinosaurios ceratópsidos en actitud de proteger sus huevos. (Los especialistas del Museo Americano de Historia Natural han demostrado hace poco que tales huevos pertenecían en realidad al *Oviraptor*.) La pintura se halla ahora expuesta en el Museo Field de Historia Natural de Chicago.**

“asnos de movimientos perezosos” idóneos para quedar extintos en favor de “mamíferos pequeños, despiertos, de sangre caliente”. Pero en la misma página señalaba que los dinosaurios depredadores eran “de constitución ligera, para poderse mover con rapidez, y, para ser reptiles, francamente sagaces”. Tampoco dibujaba siempre a los dinasaurios con forma reptiliana “típica”. En una de sus pinturas mostraba a un par de *Triceratops* atentos a un juvenil. En ocasiones introducía grupos sociales de dinosaurios herbívoros. Y tras el descubrimiento en Asia Central de nidos de dinosaurio, pintó, por sugerencia de Osborn, diminutos protoceratópsidos en actitud de proteger sus huevos.

Las limitaciones de la época se aprecian con nitidez en la obra más célebre de Knight, que muestra un *Triceratops* cornúpeta enfrentándose a dos *Tyrannosaurus*. No sabía que enormes osarios acabarían por revelar que ciertos dinosaurios astados vivían en manadas. Además, en la pintura de Knight apenas ocurre nada entre el herbívoro y los depredadores. Las patas de todos ellos están firmemente plantadas en el suelo. A decir verdad, la regla “todas las patas en el suelo” vale para casi todas las figuras de dinosaurios creadas por Knight. Aunque dibujó con frecuencia mamíferos, incluso grandes, en marcha o a la carrera, casi nunca representó a los dinosaurios en estas formas. Solía dar a sus dinosaurios un color uniforme, con tonos grises o verdes parduscos. Cabe en lo posible que los dinosaurios fueran de tales colores, pero es probable



***AGATHAUMAS* ASTADO. Una de las primeras obras de Knight, fue concluido bajo la dirección de Cope en 1897, para el Museo Americano de Historia Natural. En tiempos de Cope, las descripciones ofrecidas por los paleontólogos solían abundar en descripciones tan imaginativas como carentes de pruebas. El animal que vemos a la izquierda exhibe, para la concepción moderna, un número excesivo de adornos.**



DINOSAURIOS NORTEAMERICANOS, pertenecientes al Cretácico Superior, según el mural que Knight pintó a finales de los años veinte para el Museo Field de Historia Natural. Destacan en esta escena un tanto neblinosa una variedad de criaturas en movimiento, entre las que vemos, de izquierda a derecha, un *Corythosaurus*, una manada de *Parasaurolophus*, un *Palaeoscincus* acorazado, varios *Struthiomimus* y algún que otro hadrosaurio de cabeza plana (llamados *Edmontosaurus*).

que tuvieran visión en color, parecida a la de las aves y los reptiles, y sus pieles escamosas hubieran sido bases adecuadas para una pigmentación más intensa. De ahí que los artistas modernos apliquen ya colores vívidos a los dinosaurios.

Knight se sirvió de sus vastos conocimientos de anatomía para lograr que seres extinguidos ofrecieran un aspecto tan real que quienes los contemplaran afimarían que él los había visto. Esta habilidad explica sin duda la razón de que sus pinturas sigan pareciendo plausibles. Pero en ciertos aspectos este aparente verismo era superficial. Aunque Knight realizó estudios músculo-esqueléticos detallados de animales vivos, no preparó estudios similares de los dinosaurios, tal vez porque los esqueletos sólo revelan información limitada acerca de la musculatura de los animales. En cambio, Knight esbozó montajes de los esqueletos, modeló burdas esculturas o compuso a mano alzada restauraciones de supuestos reales, tradición que muchos artistas e ilustradores de dinosaurios han seguido.

A finales de los años sesenta, antes de que se abriera paso la idea de que los dinosaurios eran seres dotados de gran poderío, Knight aplicaba un convenio anatómico que me tenía perplejo, a pesar de no ser yo más que un alevín de ilustrador de dinosaurios. Yo sabía que los dinosaurios eran tenidos por reptiles y que los lagartos y los cocodrilos poseen músculos estrechos en los muslos, anclados en un cintura pelviana pequeña. En coherencia con esta teoría, Knight dotaba a los dinosaurios de muslos finos, de tipo reptiliano. Sin embargo, al examinar esqueletos, me parecía que la constitución de los dinosaurios se asemejaba más a la de las aves y los mamíferos, provistos de fuertes cinturas pelvianas donde anclar los poderosos músculos de los muslos. ¿Qué podía hacer un adolescente, ilustrador en ciernes de dinosaurios? Copiar a Knight, a pesar de que Alfred S. Romer, reputado paleontólogo de Harvard, había presentado correctamente a los dinosaurios como las aves, con anchas cinturas y poseedores de fuerte musculatura, en sus estudios sobre la evolución de la musculatura de los tetrápodos, allá por los años veinte. La paradoja quedó resuelta en los años setenta, cuando apareció la nueva hipótesis de que los dinosaurios eran seres de "sangre caliente". Un animal dotado de caderas grandes y poderosos músculos femorales habría de contar con un sistema aeróbico capaz de sostener elevados niveles de actividad durante períodos prolongados.

Los artistas tienen algo de magos. Nos valemos de ilusiones ópticas para hacer creer al observador que está viendo una porción de la realidad. Dado que el repertorio de trucos ópticos de que disponen aumenta con el tiempo, la mayoría de los pintores tienden a mejorar con la edad. Sin embargo, el último decenio de Knight no estuvo a la altura de sus realizaciones anteriores. La culpa pudo deberse a que su vista era cada vez peor. Por otra parte, hacía mucho que Osborn había fallecido, y la Gran Depresión y la Segunda Guerra Mundial habían sumido el estudio de los dinosaurios en una especie de letargo, del que no despertaría durante treinta años. Knight jamás llegó a tener noticia de los campos de nidificación de los dinosaurios, de la migración en masa de manadas, de los hábitats polares, de la forma de la cabeza del *Apatosaurus*, de los impactos de meteoritos gigantes, ni pudo saber que las aves son dinosaurios vivientes. No obstante todo ello, sus recreaciones determinaron en su día los más altos criterios de calidad artística —y siguen estimulando a aquellos de nosotros que hemos seguido sus pasos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

LIFE THROUGH THE AGES, Charles R. Knight. Alfred A. Knopf, 1946.

DINOSAURS, MAMMOTHS, AND CAVEMEN. S. M. Czerkas y D. F. Glut. E. P. Dutton, 1982.

DINOSAURS PAST AND PRESENT. Compilación de S. J. Czerkas y E. C. Olson. University of Washington Press, 1987.

THE DINOSAUR SOCIETY'S DINOSAUR ENCYCLOPEDIA. Don Lessem y Donald E. Glut. Random House, 1993.

Almacenamiento de residuos nucleares

El estudio de la geología y la historia del monte Yucca aporta claves útiles para abordar con decisión el enterramiento de los residuos, pero no logra dar soluciones definitivas

Chris G. Whipple

En el medio siglo de era nuclear que llevamos, los Estados Unidos han acumulado unas 30.000 toneladas de barras agotadas de combustible, procedentes de los reactores nucleares, y 380.000 metros cúbicos de residuos radiactivos de alto nivel, generados en la producción de plutonio con fines militares. Pese a largos años de estudios y miles de millones de dólares gastados en investigaciones, ni un gramo de ese material ha encontrado acomodo definitivo.

Las barras, que se acumulan a un ritmo de seis toneladas por día, permanecen en su mayoría en los reactores donde se irradiaron, en estanques de agua o, a veces, en bidones de acero sobre bases de hormigón. Los residuos de alto nivel llenan enormes tanques en las instalaciones gubernamentales emplazadas en los estados de Washington, Carolina del Sur, Idaho y Nueva York. Algunos han sufrido fugas, poniendo de manifiesto la apremiante necesidad de una solución duradera, eficaz y coherente del problema.

El gobierno federal redujo en 1987 a una las opciones a largo plazo para la eliminación de los residuos: almacenarlos de forma permanente en galerías excavadas en las profundidades rocosas bajo el monte Yucca, al sur de Nevada. Desde entonces, el Departamento de Energía, que tiene a su cargo casi todos los residuos nucleares de alto nivel, ha gastado 1700 millones de dólares en estudios científicos y técnicos encaminados a esclarecer si un cementerio así, enterrado bajo una montaña, podría almacenar de manera segura los desechos.

Pero el estado de Nevada se ha opuesto vigorosamente desde un principio al proyecto y ha recabado por su cuenta informes de otros expertos. No está claro que pueda bloquear el proyecto, pero su oposición decidida complicará una empresa muy difícil ya de por sí.

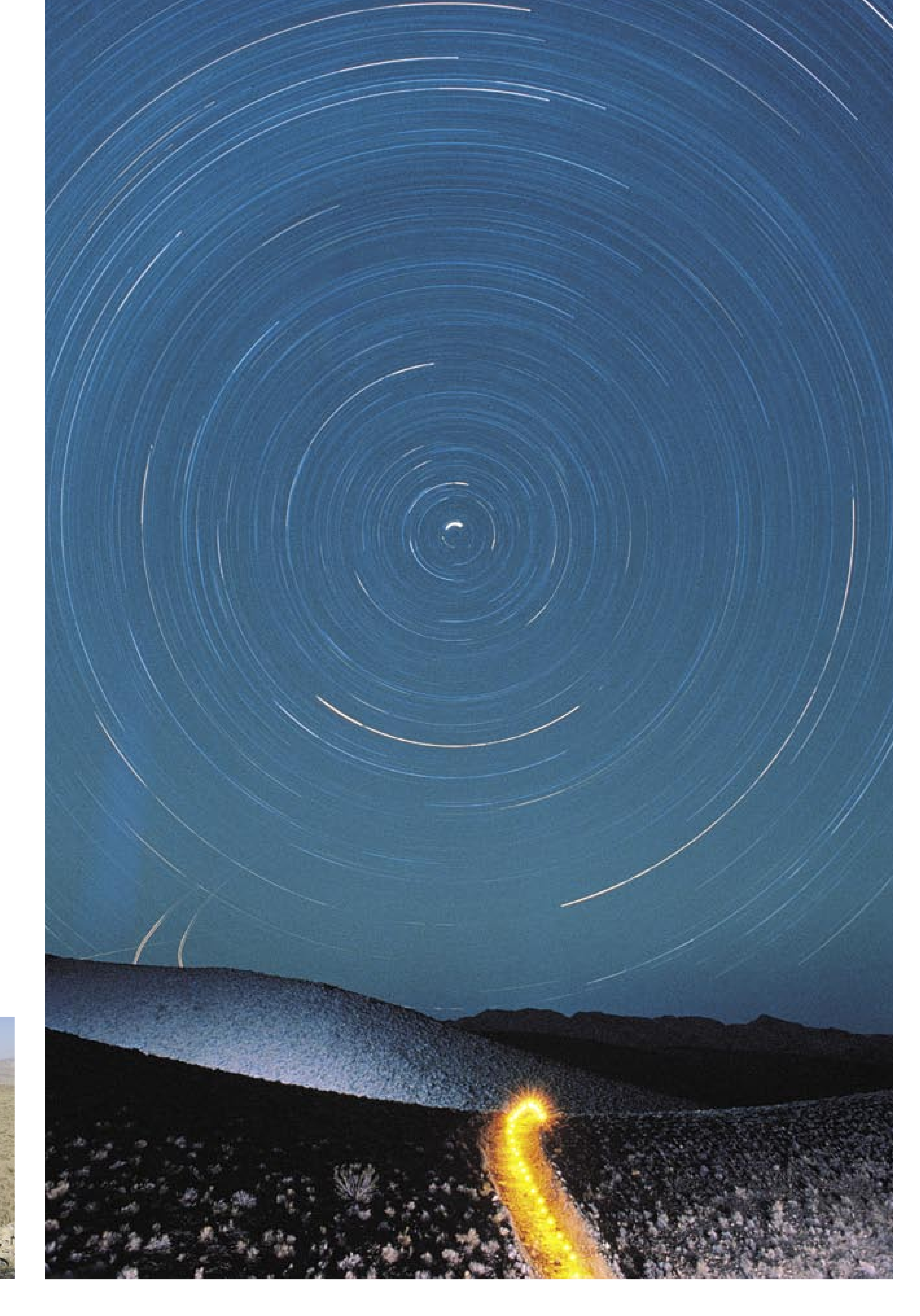
Al propio tiempo, existe imperativo legal para comenzar a actuar. Desde 1982 las empresas nucleares han aportado 12.000 millones de dólares al Fondo de Residuos Nucleares y una cuenta de garantía bloqueada asociada. A cambio, el Departamento de Energía se comprometió a construir un cementerio nacional y a responsabilizarse, desde 1998, de los residuos producidos por las compañías. Pero aunque termine por construirse un cementerio nuclear en el monte Yucca, no podrá, según las últimas estimaciones, hacerse cargo de los residuos hasta después del año 2015. Ante esa perspectiva, las empresas han recurrido al Tribunal de Apelaciones, en Washington, D. C., para que se fije a qué tendrán derecho en el plazo de dos años. Por si fuera poco, sendos acuerdos legales con los estados de Washington y Carolina del Sur obligan al Departamento de Energía a encerrar los residuos de alto nivel de los tanques en bloques de vidrio, para su posterior envío a un cementerio.

Para enmarañar más la situación, existe un duro debate sobre la conveniencia o no de sellar para siempre el combustible ya consumido y los residuos radiactivos en un cementerio instalado en las profundidades geológicas. Pero las enmiendas de 1987 a la Ley de Gestión de los Residuos Nucleares decretan que se congreguen los desechos en el monte Yucca si se prueba que es un lugar adecuado para ello. ¿Lo es?

La respuesta, en parte al menos, se ha de encontrar en las profundidades de esa masa de roca. El monte Yucca linda con el Recinto de Pruebas Nucleares de Nevada, donde, hasta no hace mucho, el Departamento de Energía ensayaba armas nucleares. La serranía, que se extiende a lo largo de 29 kilómetros, se eleva unos cientos de metros sobre las tierras circundantes y está formada por una toba volcánica, tipo de roca constituida por cenizas volcánicas, a la que se le calculan entre 11 y 13 millones de años de antigüedad.



1. EL TIEMPO deja su huella en los residuos nucleares y en los materiales de los bidones que los almacenan. Tal efecto constituye el objeto de los estudios que han de determinar la probabilidad de un enterramiento seguro en el monte Yucca. Las últimas directrices indican que un cementerio construido bajo la montaña debería poder aislar su contenido durante nada menos que un millón de años, período tan largo que las estrellas —mostradas aquí en una fotografía de larga exposición— se apartarían un poco de las constelaciones actuales. La banda de luces amarillas marca uno de los senderos de la montaña.



Aunque se han emprendido los trabajos preliminares en un túnel de exploración, muchos detalles del diseño no son todavía definitivos. La idea es que se dispongan horizontalmente en galerías los bidones de combustible consumido a 300 metros bajo la superficie y de 240 a 370 metros por encima del nivel freático. Cuando el cementerio esté lleno, se mantendrá bajo control durante al menos 50 años y luego se sellará.

Se han sopesado otras posibilidades: hundimiento de los residuos radiactivos en los fondos oceánicos o incluso su envío al espacio exterior. Pero los Estados Unidos y los demás países con programas de eliminación de los residuos de alto nivel optan por la construcción de cementerios geológicos profundos, como el previsto en Yucca. Sin embargo, ninguna nación ha enterrado todavía combustible agotado o residuos de alto nivel en instalaciones de ese tipo. En estos momentos la única verdadera alternativa al cementerio es el almacenamiento a largo plazo en la superficie. Aunque menos caro, no se trata de un medio de eliminación genuino, pues hay que seguir cuidando los materiales y mantener constantemente las condiciones de seguridad. Se ha sugerido también una propuesta híbrida: almacenar en el subsuelo el combustible consumido y los residuos de alto nivel pero dejando abierta la instalación por tiempo indefinido.

Al cementerio del monte Yucca se accedería por un par de túneles, los lados de un bucle en U que atravesaría la montaña; el cementerio estaría en el codo de la U. Esos túneles de poca pendiente son una característica atractiva que lo montañoso del lugar hace posible. Se ha excavado la mitad de la U, lo que permite estudiar el interior del monte. El túnel ha penetrado unos cinco kilómetros y ha llegado al emplazamiento que tendría el cementerio. En estos momentos se progresa rápidamente con una perforadora de túneles de 7,6 metros de diámetro, que avanza en la roca 30 metros al día.

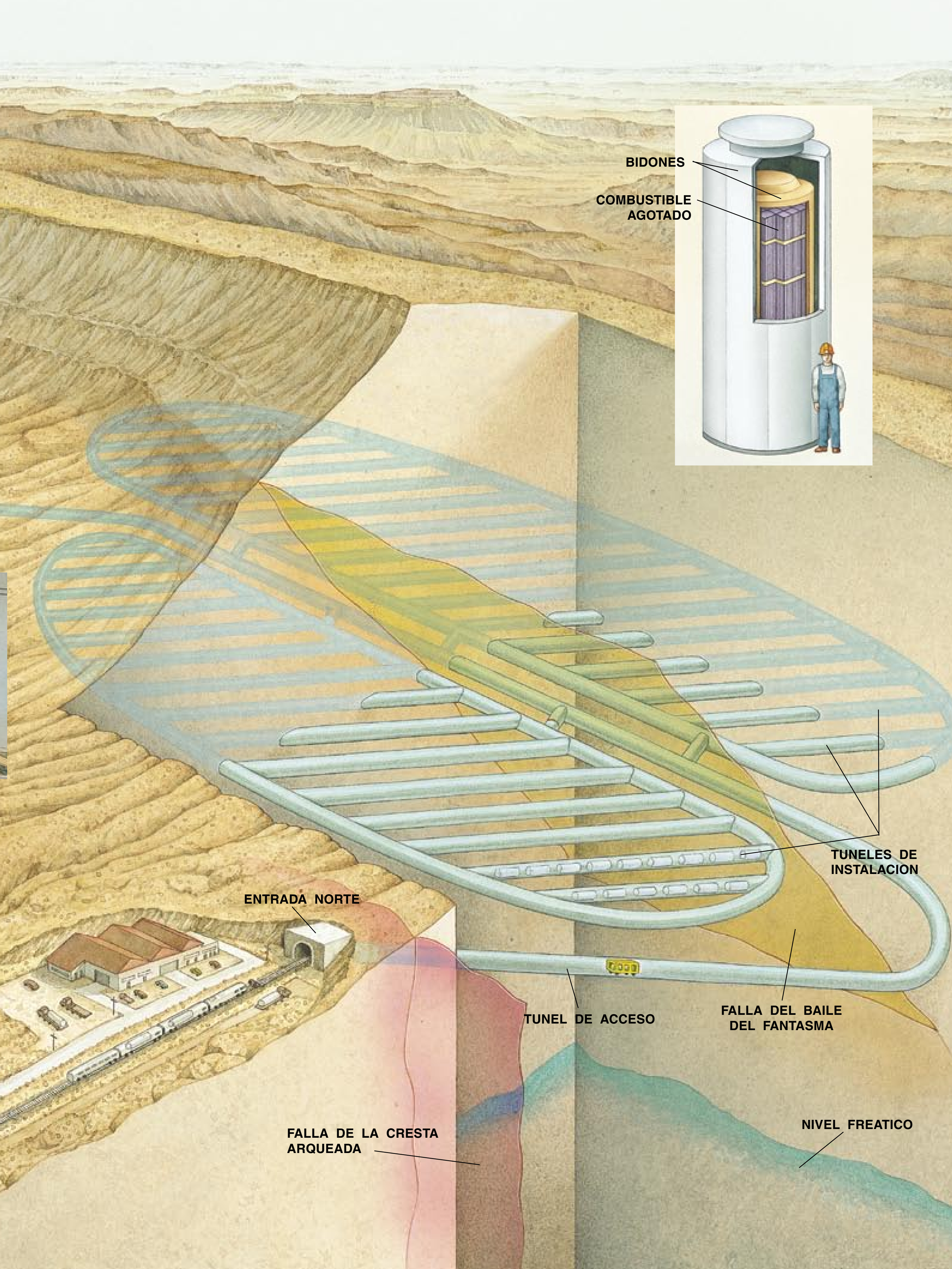
El proyecto prevé que el cementerio se divida en dos secciones para evitar las fallas geológicas más importantes. Su detección y caracterización es el objetivo de varios trabajos que están a punto de acometerse. La Falla del Baile del Fantasma, la mayor y principal, parte en dos el emplazamiento del cementerio. El diseño más preciso de éste espera a que se disponga de más información sobre ella y sobre las otras fallas que atraviesan el volumen donde deberán excavarse las galerías.

Los planes actuales proponen un cementerio capaz para 70.000 toneladas de combustible nuclear consumido. El 90 por ciento (63.000 toneladas) procedería de las centrales atómicas comerciales y el resto consistiría en residuos militares. En cuanto a éstos, el límite de 7000 toneladas se refiere al combustible agotado que originalmente se irradió y dio lugar a los residuos, una mezcla, ahora, de líquidos y sólidos.

El objetivo de las 63.000 toneladas cubriría la mayor parte del combustible comercial consumido, aunque no todo, que se generará en los Estados Unidos si no se construyen nuevos reactores y la vida de los que ahora funcionan es de 40 años. Se calcula que las centrales habrán acumulado 84.000 toneladas el día que caduquen sus licencias de explotación. Pero las 7000 toneladas asignadas a los residuos militares ni siquiera serían suficientes para el inventario de residuos y combustible agotado procedentes de Hanford. No existe hoy en día plan alguno que establezca el emplazamiento de un segundo cementerio.



2. EL CEMENTERIO SUBTERRANEO se excavaría en la roca a 300 metros de la cumbre del Yucca y de 240 a 370 metros sobre el nivel freático. Constaría de varias secciones para evitar la Falla del Baile del Fantasma (*naranja*) y cualquier otra falla importante que la investigación en marcha descubra. Según una de las soluciones propuestas, el combustible nuclear consumido se almacenaría en bidones de aleación metálica que a su vez se incluirían en otros de acero; los bidones se transportarían en vagonetas que se moverían por carriles de pendiente suave. En los túneles de instalación que constituirían el cementerio se colocarían, horizontalmente, unos 12.000 bidones.


BIDONES
COMBUSTIBLE AGOTADO
TUNELES DE INSTALACION
ENTRADA NORTE
TUNEL DE ACCESO
FALLA DEL BAILE DEL FANTASMA
FALLA DE LA CRESTA ARQUEADA
NIVEL FREATICO

Aparte de las actividades encaminadas a descubrir las características y propiedades geológicas del monte Yucca, el Departamento de Energía pondera el rendimiento a largo plazo de distintos diseños del cementerio, así como las formas diversas de empaquetar los residuos y materiales idóneos para ello con el propósito de aislarlos mejor del entorno.

Se ha dedicado particular atención al estudio de la exposición de los humanos a los materiales radiactivos de un cementerio. Se han investigado decenas de situaciones posibles. En la posibilidad que ha merecido mayor reflexión, los bidones se corroen, el agua arrastra elementos radiactivos (radionúclidos) del combustible consumido o de los residuos de alto nivel vitrificados y los transporta hasta las aguas freáticas. En esa situación, las personas quedarían expuestas si usasen el agua para cualquiera de los fines habituales: beber, lavar o regar.

El cementerio de Yucca, sin embargo, opondría por sí mismo cierta resistencia a tales azares. Almacenaría los residuos sobre las aguas freáticas en una roca del tipo que se llama insaturado. Según la cantidad de agua que fluya a través de la montaña y entre en contacto con los residuos, se podría retrasar el progreso de los materiales radiactivos hacia las aguas subterráneas durante mucho tiempo y su velocidad sería pequeña comparada con la que tendría en un recinto que estuviese bajo el nivel freático.

Una ventaja adicional es que las operaciones que se efectúen en el cementerio, recuperar el combustible gastado, por ejemplo, o hacer reparaciones, serían más sencillas en la roca insaturada. A unos les parece que la recuperación deliberada del combustible es una posibilidad remota o una amenaza contra la no proliferación; a otros, que abandonarlo es un derroche disparatado. Dada la enorme cantidad de energía que contienen el plutonio y el uranio del combustible agotado, su recuperación deliberada en algún momento lejano es una posibilidad razonable que debe tenerse en cuenta, y esa operación sería más sencilla en el monte Yucca que en otros cementerios considerados.

La probabilidad de que las personas entren algún día en contacto con los radionúclidos del monte Yucca y la magnitud de la dosis que recibirían dependen de muchos factores. Algunos pueden cuantificarse bastante bien para cualquier tiempo futuro; otros no. Entre los primeros está el contenido de los residuos, que se determina a partir de la desintegración radiactiva de ciertos isótopos y el consecuente aumento de otros. De forma similar, se cree que la dilución y la dispersión de los radionúclidos en las aguas freáticas a medida que el agua se filtre desde el cementerio son calculables con una precisión razonable, basándose en el buen conocimiento de los procesos que intervienen y en lo que se ha aprendido de muchas bolsas de agua contaminada.

Entre los factores importantes que, en este momento, se desconocen está la velocidad de infiltración, es decir, la velocidad a la que el agua va filtrándose a través de la montaña. En Yucca sólo caen 16 centímetros de lluvia al año. La mayor parte de esa agua se evapora, pero una fracción penetra en el suelo. Su movimiento es el factor principal para determinar la duración de los bidones enterrados (cuya tasa de corrosión depende mucho de la humedad que sufran). Las velocidades de flujo se calculan a partir de la edad del agua que se encuentre en la zona sobre el nivel freático y que se calcula a partir de las proporciones entre los isótopos del carbono, el cloro y el uranio.

Pero puede que resulte difícil caracterizar la variabilidad de la velocidad de infiltración del agua de la lluvia a través de la montaña, y no cabe desechar la posibilidad de que los cambios del clima generen un flujo mayor. Por otra parte, las capas de caliche, una forma de carbonato cálcico, o de otros materiales bastante impermeables, podrían servir de barreras que frenasen el movimiento descendente del agua.

Compleja e incierta es también la prospección del movimiento futuro de los radionúclidos desde el cementerio hacia las aguas freáticas. Si el agua fluyese a través de las fracturas de la roca, el tiempo de transporte sería más corto, y las zeolitas —rocas que contienen silicatos y tienden a retener muchas sustancias químicas— no frenarían mucho los radionúclidos. Pero si el flujo descendente se produjera a través de la roca propiamente dicha, el tiempo de viaje y el retardo de los radionúclidos serían mayores. No se puede saber con precisión en qué proporción se mezclan el flujo por las fracturas y el filtrado a través de la roca porque no podemos analizar la montaña entera con la finura que sería necesaria.

3. DESPLAZAMIENTO del elemento radiactivo neptunio 237 por el interior del monte Yucca un millón de años después de su almacenamiento, según una simulación por ordenador. El patrón azul de líneas muestra una sección transversal de la montaña; el amarillo indica la roca impregnada de neptunio. La imagen ampliada muestra dónde estuvieron los bidones, destruidos hace ya mucho. La figura inferior perfila los estratos geológicos.

La disposición de los asentamientos humanos plantea un problema mayor. Una de las limitaciones más evidentes en el cálculo de riesgos derivables de un proyecto de cementerio como el del monte Yucca estriba en que debe conformarse con las conjeturas sobre el futuro emplazamiento y lugar de trabajo de las poblaciones venideras. Nadie sabe qué pasará en un futuro lejano. Pero ciertas conjeturas avalan algunas previsiones del mañana. En síntesis, para que el cementerio de Yucca fuese peligroso tendría que haber una población sobre una bolsa radiactiva de aguas freáticas contaminadas por fugas del cementerio, o en sus aledaños; además, esa población tendría que usar pozos que penetrasen en la bolsa y no ser capaz de detectar la contaminación.

Se han cribado otras situaciones en las que se liberaría radiación. Por ejemplo, las derivadas de episodios volcánicos cercanos al monte y las que causaría una intromisión humana involuntaria relacionada con la minería. El Estudio Geológico de los Estados Unidos y otras empresas contratadas por el Departamento de Energía que han analizado los volcanes vecinos han valorado la probabilidad de que se vuelvan activos en el futuro; parece pequeña. También se han estudiado los terremotos, pero el registro histórico indica que suelen ser mucho menos dañinos para las estructuras subterráneas que para las superficiales. Las cábalas acerca de si se colarán en las instalaciones seres humanos es como pretender determinar qué tipo de sociedad ocupará el monte Yucca: es interesante pensar en ello, pero imposible saberlo.



4. LA MAQUINA EXCAVADORA DE TUNELES ha perforado ya cinco kilómetros en el monte Yucca. Esta fotografía está tomada en la misma dirección que sigue la excavación, así que sólo es visible la parte trasera de la perforadora, que mide 73 metros de largo (*arriba a la derecha*). En estos momentos el túnel se usa sobre todo para los estudios de sismicidad y movimientos de agua.

La falta de una tabla de criterios claros a aplicar debilita el valor de las hipótesis de futuro. La pregunta sobre la seguridad del almacenamiento de los residuos en Yucca nos trae a otra anterior. ¿Qué hemos de entender por "seguro"? Carecemos de respuesta. El Departamento de Energía está elaborando una norma no definida todavía. El Congreso de la nación ordenó en 1992 a la Agencia de Protección Medioambiental y al Consejo Nacional de Investigación que desarrollasen nuevos criterios específicos para el monte Yucca que se basaran en las recomendaciones de la Academia Nacional de Ciencias. Tenemos ya las directrices de la Academia, pero las nuevas normas de la Agencia se están todavía elaborando. Se espera que el Consejo comunique sus propuestas después de que la Agencia se pronuncie.

Tampoco se ha resuelto una cuestión principalísima: el tiempo que el cementerio debería guardar los residuos. Hasta hace poco la escala temporal se cifraba en los 10.000 años marcados por la Agencia. Mas, para el caso de la serranía, las recientes recomendaciones de la Academia Nacional de Ciencias a la Agencia y el Consejo han puesto en entredicho tal límite. La Academia opina que el cementerio debería guardar los residuos hasta que su peligro empezara a declinar, aunque ello suponga un millón de años. No se sabe todavía qué responderán la Agencia y el Consejo a esta recomendación.

Si los bidones de residuos y otros tipos de almacenamiento se diseñasen apropiadamente, sería muy verosímil que el cementerio de Yucca evitase durante 10.000 años la fuga en cantidades apreciables de residuos al medio. La vida prevista de un bidón de residuos se basa en la tasa de corrosión de los diferentes materiales que se empleen y en las condiciones del cementerio. Los expertos sopesan varios materiales cerámicos y aleaciones de acero y titanio para su uso en Yucca.

Por desgracia, en la duración de los bidones de residuos es donde los inconvenientes contrarrestan las ventajas de un cementerio insaturado. En concreto, las condiciones químicas de éste favorecen la oxidación, es decir, tienden a promover la reacción con el oxígeno. Por contra, un emplazamiento saturado bien elegido podría ser un entorno reductor y tendería a evitar las reacciones entre los metales y el oxígeno.

Parece más difícil conseguir unos bidones de larga duración para los residuos en un entorno oxidante que en otro reductor. El programa sueco de retirada del combustible agotado, por ejemplo, planea usar bidones con revestimiento de cobre en un cementerio saturado cercano a la costa.

CHRIS G. WHIPPLE es vicepresidente de ICF Kaiser, firma de ingeniería ambiental, tratamientos depuradores y asesoría. Encabezó la Junta de Gestión de los Residuos Radiactivos de la Academia Nacional de Ciencias y fue uno de los fundadores de la Sociedad de Análisis de Riesgos.

Vivir con los residuos radiactivos de alto nivel

Los residuos radiactivos de alto nivel, creados por la fisión nuclear, proceden de dos fuentes diferentes: la generación comercial de energía atómica y la producción de plutonio para armas nucleares.

Los residuos comerciales y militares difieren en varios aspectos de interés por lo que concierne a su seguridad en un cementerio. Entre los diversos tipos de residuos militares está el combustible agotado. Con mucho, el mayor componente son los residuos de reprocesamiento que se almacenan en los depósitos subterráneos del complejo de Hanford, en el estado de Washington, y en el recinto del río Savannah, de Carolina del Sur. De ellos se ha extraído, por reprocesamiento químico, casi todo el uranio y el plutonio; su naturaleza actual es peligrosa por la presencia de otros elementos radiactivos, creados por la fisión. El combustible consumido de las centrales nucleares contiene, además de los productos de la fisión, cantidades considerables de uranio y plutonio.

En razón de tales diferencias, los residuos nucleares se desintegrarán y adoptarán un estado más seguro antes que el combustible agotado. Por lo que respecta a éste y a los residuos nucleares que hayan permanecido almacenados más de diez años, los radionúclidos dominantes en el momento de la eliminación son el cesio 137 y el estroncio 90, ambos con semividas de unos 30 años. Al principio el cesio y el estroncio generan la mayor parte del calor de una muestra de residuos y determinan los requisitos del blindaje que protege a los trabajadores. Pasados varios siglos se habrán desintegrado tanto, que ya no serán motivo de preocupación.



LOS RESIDUOS VITRIFICADOS están encerrados en vidrio; esta muestra no es radiactiva

Desaparecidos el cesio y el estroncio, el producto de fisión más peligroso en el combustible agotado y en los residuos militares será el tecnecio 99, con una semivida de 211.100 años. A diferencia de los residuos militares de alto nivel, el combustible consumido también contiene americio 241 (con una semivida de 432,2 años), carbono 14 (5730 años), plutonio 239 (24.110 años), neptunio 237 (2,14 millones de años) y una serie de isótopos menos importantes. Se le ha prestado mucha atención al carbono 14; lo que no hacen casi todos los demás radioisótopos del residuo, aquél podría liberarse directamente, convertido en dióxido de carbono gaseoso, del cementerio.

Una segunda diferencia de peso entre los dos tipos de residuos es la forma física que tienen en el momento de su retirada. Antes de que los residuos que ahora se guardan en los depósitos del Departamento de Energía se lleven a un cementerio se extraerán de ellos algunos componentes muy radiactivos, que se vitrificarán (se los mezclará con otros ingredientes para hacer un vidrio) e introducirán en bidones de acero inoxidable. Se espera que los residuos de Hanford produzcan entre 10.000 y 60.000 de estos "troncos" de vidrio, cada uno de tres metros de largo por dos tercios de metro de diámetro.

El combustible comercial agotado consiste en el combustible propiamente dicho, una cerámica de dióxido de uranio, encerrado en un revestimiento de aleación de circonio. Grupos de estos elementos de combustible nuclear se introducirán en grandes bidones de residuos para enterrarlos en un cementerio.

—C.G.W.

Los suecos calculan que perdurarán un millón de años. Una "ventaja" adicional de la opción sueca es que si el cementerio, pese a todo, acaba por tener fugas, irán a parar al océano y no a un acuífero potable.

Puede que el mejor material para los bidones en un ambiente insaturado y oxidante sean las cerámicas; tienen la ventaja de que ya están oxidadas. Parece que la protección catódica de los bidones de capas múltiples, con una capa exterior que blinda eléctricamente a la interior, también prolonga bastante la duración de los bidones.

Las investigaciones sobre la degradación de los contenedores de residuos han descubierto que los bidones que antes se corroen son los que están en contacto con el agua líquida, sea por un goteo recurrente o por un charco que se forme bajo ellos. Si el diseño del cementerio puede evitar el contacto directo con el agua, habrá que prestar atención al factor que le sigue en importancia, la humedad. Las pruebas indican que el ritmo de corrosión de los materiales posibles es muy pequeño —casi nulo— bajo una cota mínima de humedad, pero se acelera cuando sube ésta. Por desgracia, la humedad ambiente en las entrañas del monte Yucca es alta, alrededor de un 98 o 99 por ciento, y, por tanto, es corrosiva para casi todos los materiales propuestos.

El hallazgo de que el agua líquida y la mucha humedad aceleran el deterioro de los bidones ha llevado a la idea de un cementerio seco y cálido. La elevación de la temperatura de la roca circundante sobre el punto de ebullición del agua mediante el calor que emana de los propios residuos eliminaría la humedad o las acumulaciones de agua líquida corrosivas para los bidones. Los cálculos indican que, para densidades de almacenamiento altas, superiores a las 200 toneladas de uranio por hectárea, se podría mantener la temperatura del cementerio por encima de la temperatura de ebullición durante más de 10.000 años.

La cruz es que esas temperaturas altas también podrían ser perjudiciales para los materiales del cementerio y de la montaña; más calor, por ejemplo, podría incrementar la velocidad de degradación de los bidones. El departamento de energía pondera en estos momentos ese toma y daca y no ha determinado todavía qué temperatura debería mantenerse en el cementerio.

Cuando la escala temporal es de cientos de miles de años, todos los análisis sobre seguridad admiten que los bidones se han resquebrajado y que la roca interpuesta entre el cementerio y las aguas freáticas ha alcanzado el equilibrio con los productos de los residuos que se desplazan por ella. Se ha determinado la capacidad de la roca para retardar el movimiento de los residuos en esas circunstancias. Ambas, es decir, las concentraciones de radionúclidos del agua que fluye desde el cementerio y las exposicio-

nes a la radiación resultantes del uso de esa agua han alcanzado el estado estacionario. Los factores clave de este proceso son la velocidad de flujo del agua a través de la montaña, la solubilidad de los isótopos principales en esa agua, las barreras locales que impidan el acceso libre del agua a los residuos y la dilución de éstos cuando lleguen a las aguas freáticas.

Si no fuera mucha la cantidad de agua que pasase por los residuos, la solubilidad limitaría el movimiento de los radionúclidos hacia las aguas freáticas, pero cabe la posibilidad de que algunos se transportasen en forma de coloides, partículas de menos de un micrometro suspendidas en un líquido. Las prospecciones indican que, de aquí a un millón de años, la dosis máxima que recibiría un hipotético individuo que bebiese agua de un pozo a 25 kilómetros del cementerio no se alcanzaría hasta dentro de varios cientos de miles de años.

Se ha discutido bastante sobre la estabilidad que tendría un cementerio en el monte Yucca. Se han vuelto a repetir dos objeciones esgrimidas y estudiadas en otros lugares: la de mayor calado se refiere a la posibilidad de criticidad nuclear —una reacción nuclear en cadena automantenida— cuando los residuos se disolviesen y desplazasen por la montaña; la otra objeción se centra en la posibilidad de que las aguas freáticas subiesen hasta sumergir el cementerio.

Mi opinión es que se trata de "falsas alarmas" técnicas. No se puede descartar del todo que en un futuro remoto se produzca una criticidad nuclear, pero bastan unos remedios simples para que tal probabilidad resulte insignificante. Añadir uranio empobrecido a los bidones sería uno de ellos. Si contuviesen los residuos el tiempo suficiente para que se desintegraran en uranio 235, el uranio empobrecido impediría la criticidad. El proceso sería largo; el plutonio 239 tiene una semivida de 24.110 años. El uranio empobrecido evitaría que el plutonio alcanzara la concentración necesaria para la criticidad.

Tampoco parece que haya que preocuparse por la subida de las aguas freáticas hasta el cementerio. Un comité de la Academia Nacional de Ciencias estudió el problema y concluyó que no hay mecanismos verosímiles que puedan causar un aumento tan grande del nivel freático ni indicios físicos de que haya sucedido nunca.

Estos dos motivos de inquietud no valdrán mucho por sí mismos, pero resaltan la incertidumbre inherente a toda prospección analítica de un futuro lejano. Para el cementerio de Yucca, hasta la frase "en un futuro tan lejano" resulta ambigua; lo mismo puede significar diez mil años que un millón.

Se podrían idear experimentos que generasen datos para los modelos del comportamiento del cementerio, pero las predicciones de una evolución a muy largo plazo a partir de pruebas en períodos cortos de tiempo siempre son sospechosas. Desafortunadamente, pocos experimentos factibles habría, si alguno, que ofreciesen un fundamento a la prospectiva a largo plazo necesaria para evaluar el resultado del cementerio durante la vida práctica de los residuos.

Uno de los poquísimos intentos al respecto efectuados hasta ahora se basa, para predecir el rendimiento de los cementerios, en los sistemas naturales, los depósitos de mineral de uranio en concreto, que guardan parecido con ellos. Por ser uranio el componente principal del combustible consumido, y por desintegrarse el plutonio 239 en uranio, el comportamiento de éste en un emplazamiento natural da una idea de cuál sería el del cementerio. Que esos depósitos de mineral hayan existido durante muchos millones de años sin disolverse es una prueba de que, al menos en algunos emplazamientos geológicos, es posible aislar materiales de ese tipo durante períodos de tiempo muy largos. Pero lo que no se sabe es cuántos depósitos de uranio no han sobrevivido.

El futuro del proyecto del monte Yucca es incierto. De acuerdo con la ley, si el Departamento de Energía determina que el monte es lugar adecuado para instalar un cementerio, solicitará a la Comisión Reguladora Nuclear de los Estados Unidos licencia para su construcción y funcionamiento. Si la comisión la concede, el estado de Nevada podría rechazar el proyecto, pero el Congreso puede rebatir esa decisión.

Tras diez años de investigaciones y las exploraciones, la fecha previsible para que haya un cementerio donde enterrar los residuos nucleares no está más cerca que al principio. Al recorte presupuestario hemos de añadir el cercano retiro del defensor más tenaz en el Congreso de un cementerio de residuos radiactivos, el senador J. Bennett Johnston.

Las fuerzas que a principios de los años ochenta dieron lugar a la política que se ha seguido hasta ahora nacieron de la insólita convergencia de intereses de la industria nuclear y de los grupos ecologistas. Las compañías eléctricas querían que la retirada de los residuos se efectuase rápidamente porque así desaparecería un obstáculo fundamental para la revitalización de la energía nuclear, y los ecologistas deseaban con ello que el combustible agotado de los reactores no se reprocesara y se eliminara la amenaza de la proliferación, que ellos asociaban al reciclado del plutonio y a los reactores nodriza.

Tales objetivos y motivaciones nos parecen hoy una minucia. La energía nuclear tiene muchos problemas; la eliminación de los residuos sólo es uno. Aunque el problema de los residuos se resolviese mañana, es poco probable que se encargaran nuevos reactores nucleares en Estados Unidos, por razones económicas. Igualmente, los cientos de toneladas de plutonio para bombas liberados por el desmantelamiento de armas nucleares tras la guerra fría en Estados Unidos y en la que fuera Unión Soviética dejan en nada al combustible consumido de las centrales nucleares en cuanto amenaza de proliferación del armamento atómico.

El almacenamiento a cielo abierto de los combustibles consumidos es una medida provisional bien asentada técnica y económicamente. Pero no garantiza la conservación segura y eficaz de unos materiales peligrosos que existirán durante miles de años.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

TOTAL SYSTEMS PERFORMANCE ASSESSMENT-1995: AN EVALUATION OF THE POTENTIAL YUCCA MOUNTAIN REPOSITORY. Civilian Radioactive Waste Management System (Management and Operating Contractor), B00000000-01717-2200-00136, Las Vegas, 1995.

CONSIDERATIONS OF AUTOCATALYTIC CRITICALITY OF FISSILE MATERIALS IN GEOLOGIC REPOSITORIES. Report by the Department of Nuclear Engineering and the Department of Materials Science and Mineral Engineering, University of California, Berkeley, 22 de enero, 1996.

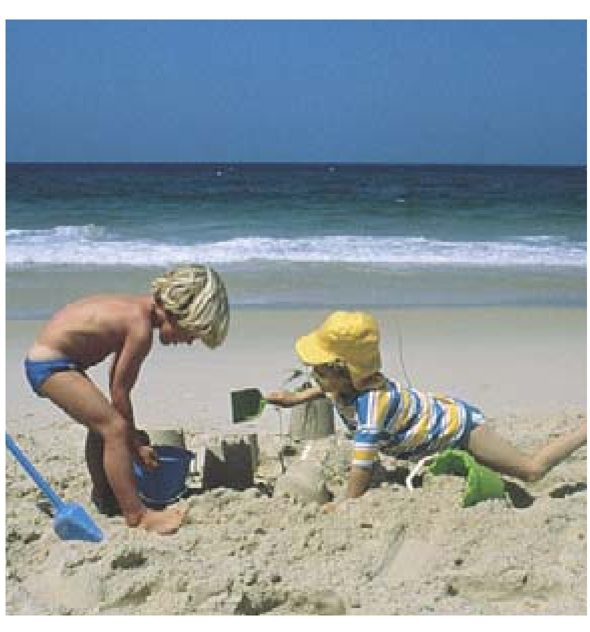
LOCALIZED DRYOUT: AN APPROACH FOR MANAGING THE THERMAL-HYDROLOGICAL EFFECTS OF DECAY HEAT AT YUCCA MOUNTAIN. T. A. Buscheck, J. J. Nitao y L. D. Ramspott [disponible como la separata UCRL-JC-121232 del Lawrence Livermore National Laboratory] en *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XIX*. Dirigido por W. M. Murphy y D. A. Knecht. Materials Research Society, Vol. 412, 1996.

Radiación solar y cáncer de piel

Aunque la mayoría de los cánceres de piel aparecen en personas de edad, las alteraciones comienzan mucho antes, con la mutación que los rayos solares inducen en una célula

David J. Leffell y Douglas E. Brash

En 1775 Percivall Pott, médico inglés, observó una llamativa incidencia de úlceras de escroto entre los deshollinadores de Londres. Otros galenos atribuirían esa patología a una enfermedad venérea que hacía estragos en la ciudad. Pero Pott fue más avispado, al percibir que padecían un tipo de cáncer de piel. El descubrimiento de Pott constituyó un hito en la historia de la medicina. Al observar que los hombres expuestos de manera continua al alquitrán eran especialmente vulnerables a esta forma de cáncer, aportó los primeros datos de que tal tumoración podría deberse, no a factores internos, sino a un agente externo.



1. LOS JOVENES BAÑISTAS, como estos niños australianos, pueden estar predisponiéndose, mientras juegan, para el cáncer de piel. Sólo uno de ellos toma precauciones.

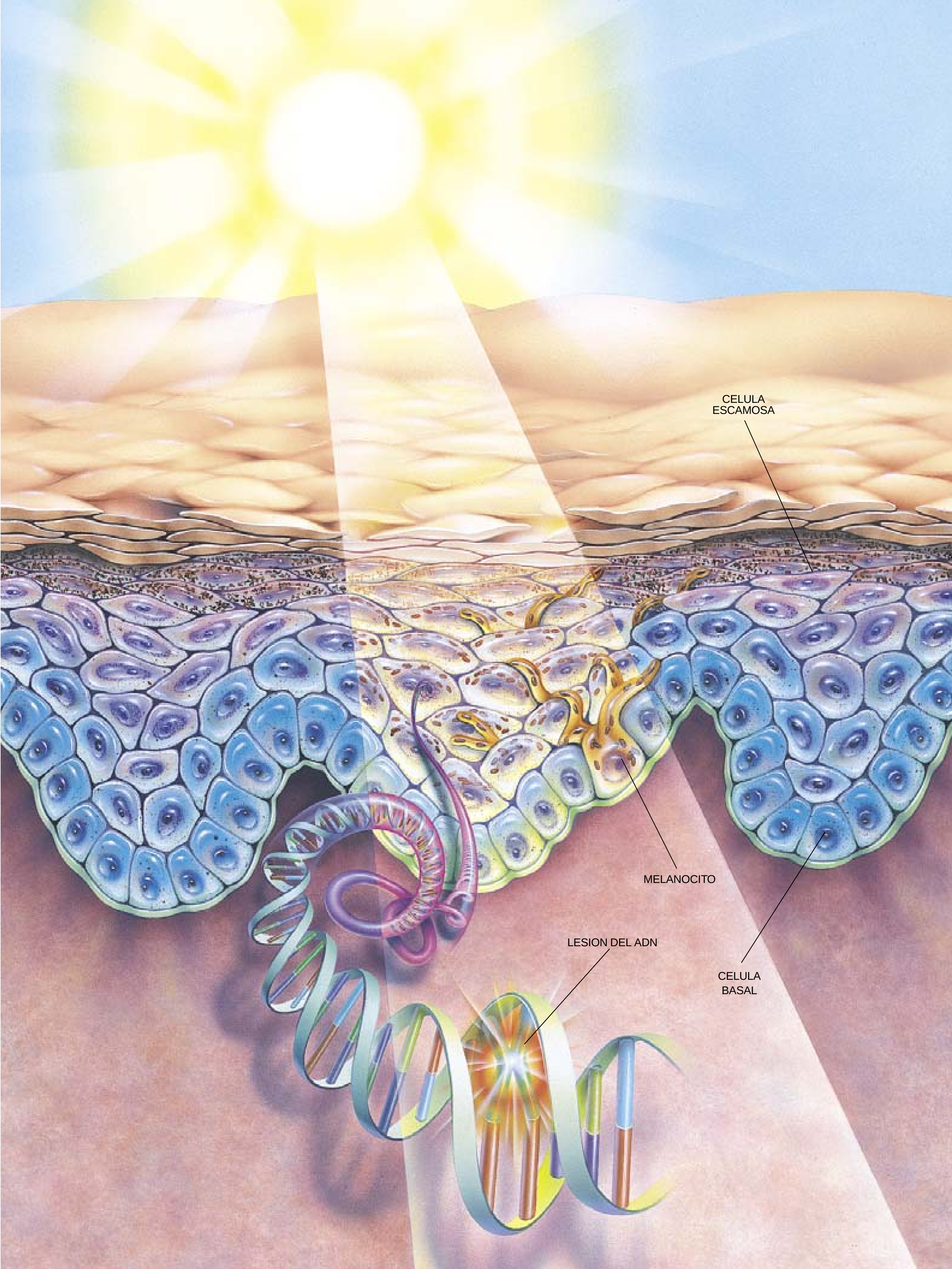
Con el tiempo los investigadores llegarían a identificar otro nexo entre el ambiente y el cáncer de piel, aunque en esta ocasión el agente es mucho más universal. El trabajo tenaz y exhaustivo de decenas de científicos ha sacado a la luz numerosos aspectos del papel ejercido por la radiación solar en la incidencia anual de un elevadísimo número de cánceres de piel.

Sólo en los Estados Unidos se registran cada año alrededor de un millón de nuevos casos, una cifra que compite con la del conjunto de otros tipos de cáncer. El cáncer de piel adopta una de las tres formas correspondientes a las tres variantes principales de células dérmicas: células basales, células escamosas y melanocitos. El melanoma maligno, cáncer de los melanocitos, constituye la forma más letal, y quizá también la más misteriosa para quienes se esfuerzan en comprender la generación de los tumores. Por fortuna, se trata del tipo menos frecuente. En los Estados Unidos se producirán en el transcurso de este año unos 38.000 casos nuevos de melanoma y unas 7000 muertes relacionadas con esta enfermedad. Las otras dos formas tumorosas distintas del melanoma completan los casos de cáncer de piel, pero el número de muertes debidas a ellos es inferior a las causadas por el melanoma. A lo largo del año en curso varios miles de personas fallecerán en los Estados Unidos de cáncer de piel no melanómico (casi exclusivamente de células escamosas).

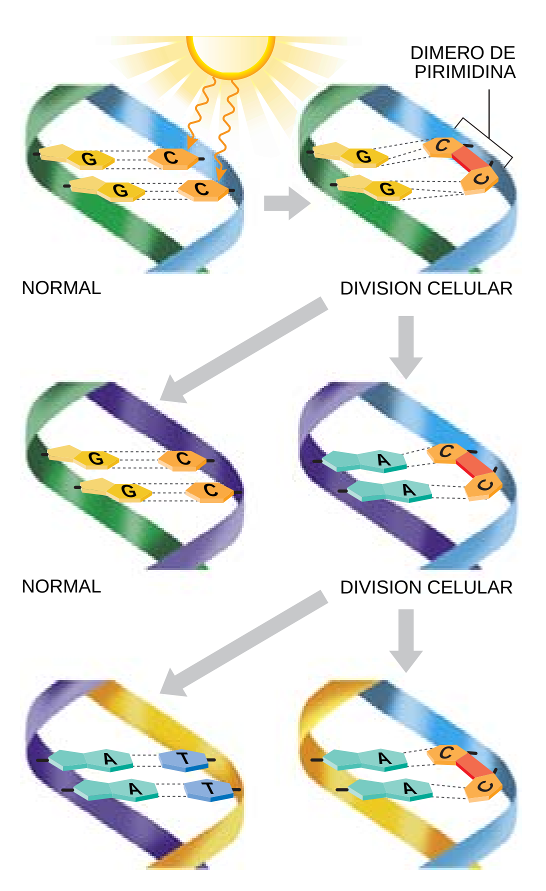
Si se diagnostican en una fase precoz, la mayoría de los casos de cánceres de piel no melanómicos pueden tratarse con anestesia local en la misma consulta. Pueden curarse mediante una serie de técnicas sencillas: raspado, cauterización, crioterapia o escisión quirúrgica del tejido canceroso. El propio melanoma, si se diagnostica cuando el tumor tiene un espesor inferior a un milímetro, puede sanar mediante una simple escisión. Ahora bien, el cáncer de piel afecta a miembros de todos los grupos de edad y, si no se ataja a tiempo, desarrolla su naturaleza deformante y letal; por esas razones, la investigación ha puesto todo su empeño en desentrañar los mecanismos causantes de la enfermedad. Un curioso episodio histórico ha venido a facilitar dicha búsqueda.

Por los años en que Pott estudiaba el cáncer de escroto, imperaba en Inglaterra un código legal que castigaba con penas muy severas delitos menores. Demasiado a menudo, la falsificación o el robo acababan en condena a muerte. La reacción contra la dureza de semejantes leyes condujo pronto a sentencias más suaves, con el hacinamiento consiguiente de las cárceles. Para aliviar la situación, la Cámara de los Comunes aprobó en los años ochenta del siglo XVIII el destierro de

2. LA PIEL HUMANA comprende tres clases principales de células, susceptibles todas ellas de convertirse en cancerosas por efecto de los rayos solares. Cerca de la base de la epidermis se encuentran unas células redondeadas, las basales. Junto a la superficie residen las células escamosas, aplanadas. Los melanocitos (células que producen el pigmento protector melanina) se hallan dispersos por la capa basal y presentan numerosas extensiones que afloran. Los rayos solares, que pueden penetrar hasta regiones profundas de la piel, dañan segmentos de ADN, particularmente vulnerables a la luz ultravioleta. La lesión de un gen llamado *p53* es clave en la génesis de cánceres de las células basales y escamosas.


CELULA
ESCAMOSA
MELANOCITO
LESION DEL ADN
CELULA
BASAL

Así produce el sol una mutación permanente



LA LUZ ULTRAVIOLETA rompe los enlaces químicos de bases pirimidínicas adyacentes, a menudo en un punto de la hebra del ADN donde coinciden dos citosinas. Se establecen entonces nuevos enlaces (*rojo*), que unen las bases afectadas en un dímero de pirimidina.

LA REPLICACION requiere que una célula separe las hebras emparejadas de ADN (*verde* y *azul*), cada una de las cuales cumple la función de molde para construir una nueva hebra (*púrpura*) —emparejando una guanina (*G*) con una citosina (*C*), y una adenina (*A*) con una timina (*T*). La hebra inalterada por la luz solar produce ADN normal (*izquierda*), pero la hebra que contiene el dímero de pirimidina distorsiona la cadena y ello hace que una *C* se empareje con una *A* en vez de *G*, que sería la base apropiada.

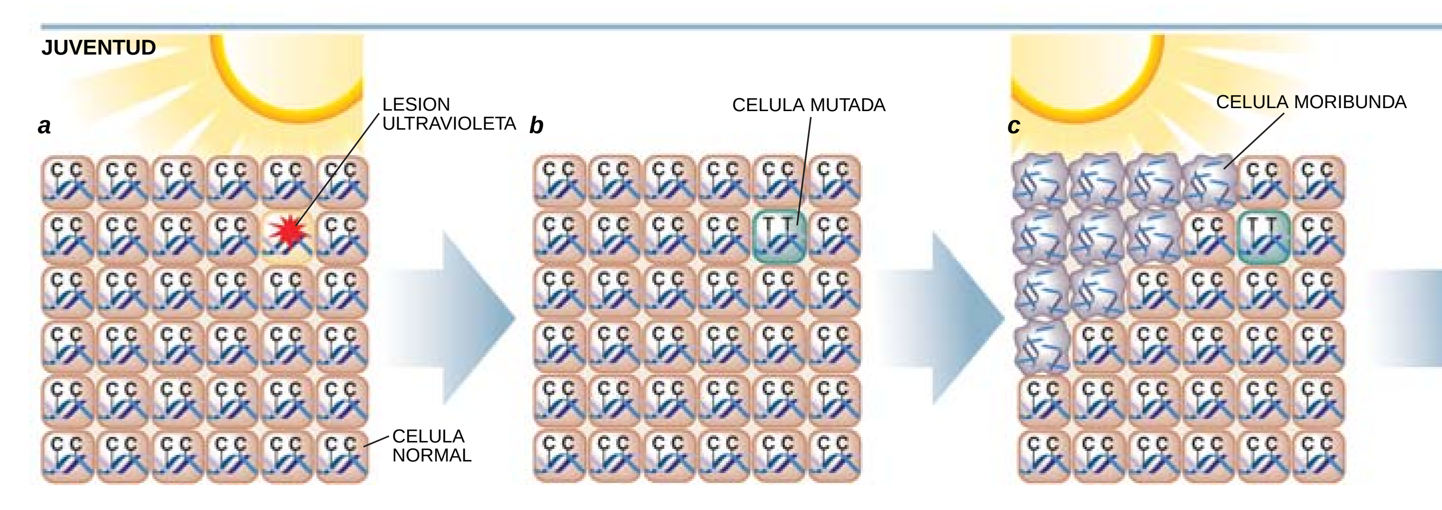
LA REPLICACION CONTINUADA repite el error, emparejando el dímero una vez más con un par de *A* (*derecha*). En la hebra opuesta (*izquierda*), estas bases de *A* se emparejan con *T*, creando una mutación genética. El dímero puede acabar eliminándose a través de una "reparación por escisión", pero la mutación de *C* en *T* se ha hecho permanente. Cuando una mutación de este tipo se produce en un gen relacionado con el cáncer, la célula se torna proclive a la tumoración.

los malhechores a regiones remotas. Se escogió una zona costera, muy poco conocida, situada al sur del Pacífico. Decenios más tarde, la costa oriental de Australia acabó poblándose con hombres y mujeres procedentes de Gran Bretaña e Irlanda. Muchos de estos forzados colonizadores eran rubios, de piel blanca, rasgos que perpetúan hoy sus descendientes.

Lo que comenzó siendo reforma penal terminó por convertirse en un experimento a gran escala sobre el nexo entre complexión, radiación solar y cáncer de piel. Con una piel muy blanca, expuesta a un sol de justicia, los actuales pobladores de Australia presentan la incidencia más elevada de todos los tipos de cáncer de piel de todo el mundo. Sus parientes británicos, que viven bajo las nubes del norte, son más afortunados; les amenaza un riesgo bastante menor de sufrir esos tumores, lo mismo que a los aborígenes australianos, que, con una piel mucho más oscura, apenas les atañen los cánceres de piel desencadenados por la radiación solar.

Desde hace más de 50 años los científicos conocían el "experimento australiano": la asociación de una piel blanca con una intensa irradiación solar constituía un importante factor de riesgo. Pero pasaron decenios sin que se supiera el mecanismo por el que los rayos solares convertían las células de la piel en células cancerosas. El esclarecimiento de ese misterio requirió algo más que un experimento accidental en un continente bañado por el sol. Han sido necesarios años de estudio paciente en muchos laboratorios de biología molecular, antes de que empezaran a entreverse los pasos primeros del proceso.

Cuando nosotros abordamos el problema a finales de los años ochenta, la sospecha recaía por igual sobre dos tipos de efectos nocivos de origen solar. En una de las categorías se encontraban las mutaciones de genes específicos de las células de la piel. Una célula puede caer en una multiplicación desenfrenada si una mutación transforma un gen normal en promotor superceloso del crecimiento (un oncogén) o inactiva un gen encargado de poner coto a la división (un gen supresor de tumores).



3. EN LA GENESIS DE UN TUMOR DE PIEL no melanómico parece estar implicada la luz del sol que altera el gen *p53* en una de las células basales o escamosas de la piel (*a*). La mutación resultante (*b*) destruye la capacidad de las células lesionadas en su material genético para retrasar la replicación en tanto no hayan reparado su ADN. La mutación *p53* bloquea también la autodestrucción de esas células cuando el daño impide la reparación. Si posteriormente los rayos

La otra clase de causas incluía procesos más generales, que afectarían a todas las células expuestas al sol. Por ejemplo, la radiación solar podría frenar o suprimir la respuesta inmunitaria de la célula (menguando su capacidad natural de eliminar células tumorales) o estimular directamente la división celular. Ante la posibilidad de explicaciones tan dispares, veíase claro que la determinación de las causas del cáncer de piel no iba a ser una tarea sencilla.

Desde el principio nos guió el conocimiento de que los efectos nocivos de los rayos solares acontecían muchos años antes de la manifestación del tumor. Habían demostrado la realidad de estos efectos retardados Anne Kricker, adscrita entonces a la Universidad de Australia Occidental, Robin Marks, del Consejo de Investigaciones contra el Cáncer de Victoria, y sus respectivos colaboradores. Observaron que, en las personas que habían emigrado antes de cumplir los 18 años desde una Inglaterra envuelta en nubes a una Australia achicharrada por el sol, la incidencia de cánceres de piel era la propia de los australianos; en cambio, si habían llegado al continente siendo ya adultos, no corrían mayor riesgo que el reconocido entre los habitantes de su país de origen.

De tales resultados se infería que los pacientes australianos con cáncer de piel tenían que haber recibido una dosis crítica de irradiación solar años antes de la manifestación de los tumores (que raramente aparecen antes de edades medias de la vida). Procesos generalizados, como la inmunosupresión, duran sólo escasos días después de que haya cesado la radiación nociva; pero los cambios genéticos persisten al transmitirse de una generación celular a la siguiente. La búsqueda de cambios genéticos se presentaba, pues, como la vía más prometedora en nuestra investigación. Decidimos, pues, iniciar la caza de mutaciones inducidas por la radiación solar que pudieran haberse producido en edades tempranas de la vida y haber servido de base para el desarrollo de un cáncer de piel en una época muy posterior.

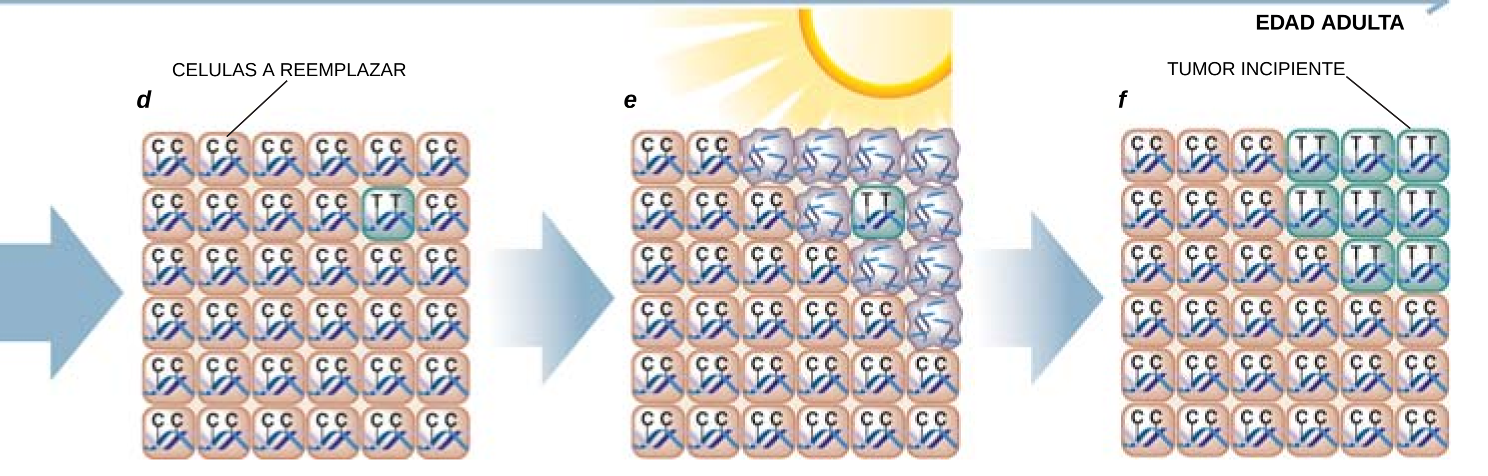
No era una tarea cómoda. El ADN de una célula humana contiene unos 100.000 genes; cada gen comprende millares de nucleótidos (las unidades que forman el ADN), sólo algunos de los cuales podrían en principio llevar algún rastro del daño inducido por los rayos solares. Había más: aun cuando lográramos identificar las mutaciones en muestras de cáncer de piel, ¿cómo podríamos estar seguros de que eran precisamente los rayos solares los causantes? No andábamos perdidos. Otros investigadores nos habían proporcionado una pista útil al descubrir que la radiación B ultravioleta —de la que desde hacía tiempo se sospechaba que era el factor carcinogénico de la luz solar— dejaba su sello característico.

Tras un amplio rastreo —desde virus hasta células humanas—, investigadores de Suiza, Francia, Canadá y EE.UU. habían demostrado que la luz ultravioleta produce mutaciones en puntos de una hebra de ADN que contiene bases específicas de nucleótidos. Las bases, partes variables de los nucleótidos, son adenina (*A*), guanina (*G*), citosina (*C*) y timina (*T*). La luz ultravioleta produce mutaciones donde una de las bases piramidínicas —citosina o timina— se encuentra junto a otra pirimidina. Alrededor de dos terceras partes de estas mutaciones son sustituciones de *C* por *T*, y alrededor del 10 por ciento de estos cambios tienen lugar en dos *C* adyacentes, con ambas bases reemplazadas por *T*. Estos rasgos de las mutaciones inducidas por la luz ultravioleta constituyen una huella característica, porque no la producen otros agentes.

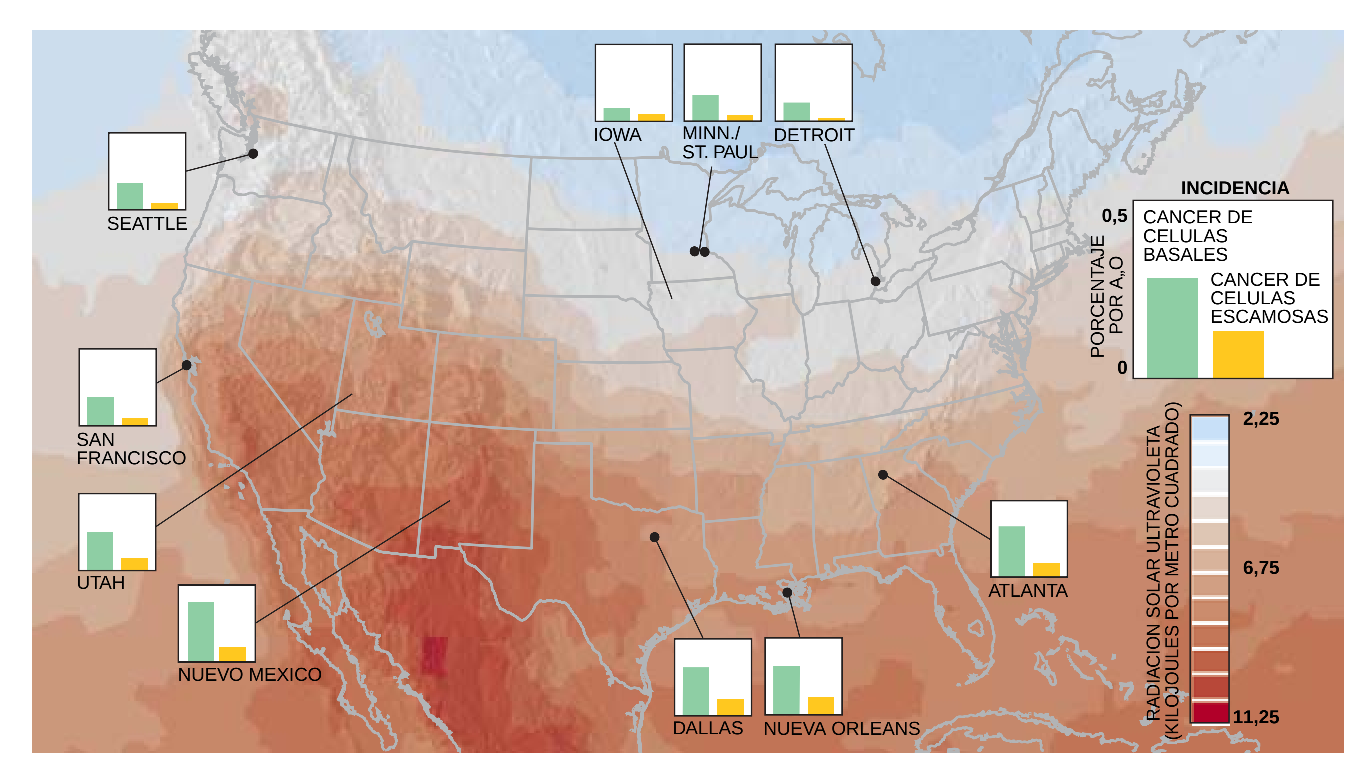
Partíamos, pues, de una buena apoyatura sobre los tipos de mutaciones especiales que resultan de la exposición a rayos solares. Pero necesitábamos determinar cuáles, de entre el ingente número de genes humanos, habían mutado para producir un efecto carcinogénico. Sospechamos que la solución se escondería en un grupo de genes humanos de los que se sabía ya su implicación en el cáncer.

Miramos a los oncogenes y genes supresores de tumores reconocidos. Escogimos el gen supresor de tumores *p53*, que muta en más de la mitad de los cánceres humanos. E imaginamos que el *p53* podría estar implicado en muchos casos de cáncer, dada la conexión sorprendente entre el cáncer de piel no melanómico y cierta rara dolencia (epidermodisplasia

DAVID J. LEFFELL y DOUGLAS E. BRASH han trabajado juntos largos años en la investigación del papel de la radiación solar en la producción del cáncer de piel. Leffell enseña dermatología y cirugía en la Facultad de Medicina de Yale, donde también da clases Brash.



solares queman células sin dañar (*c*), las células afectadas cometerán un "suicidio celular" masivo y las sustituirán células procedentes de la piel sana adyacente (*d*). Pero si los rayos solares afectan al tejido inmediato a una célula mutada en el gen *p53* que no puede autodestruirse (*e*), la célula mutada puede reemplazar a las células moribundas quemadas por el sol con su propia progenie (*f*), promoviendo por tanto el crecimiento de un tumor.



4. EL RIESGO DE CANCER DE PIEL depende en buena parte de la exposición a la radiación ultravioleta. Las mediciones de la capa de ozono y de nubes que realizan los satélites permiten calcular la cantidad de rayos ultravioleta que llegan a la superficie de la Tierra. (En la ilustración se da la media del mes de julio de 1992 en los Estados Unidos.) Las personas de piel blanca que viven en las zonas de los Estados Unidos expuestas a una intensa radiación ultravioleta durante los meses de verano son las más predispuestas a padecer cáncer de piel, porque producen menos melanina, el pigmento que protege la piel oscura contra el efecto nocivo de los rayos ultravioleta. Los gráficos de barras muestran la tasa de incidencia de cánceres de piel no melanómicos en personas de raza blanca.

verruciforme) en la que se producen tumores parecidos a las verrugas.

La investigación había ya puesto de manifiesto que estos tumores contienen ADN del papilomavirus humano; había hallado también que, cuando estos tumores residen en zonas de la piel expuestas al sol, progresan hasta desencadenar un cáncer de células basales o de células escamosas. El grupo de Peter M. Howley, del Instituto Nacional del Cáncer, había demostrado que una de las proteínas sintetizadas por el papilomavirus inactiva la proteína p53. (Los genes cifran proteínas; la proteína p53 es el producto del gen *p53*.) Así pues, todas las indicaciones apuntaban a que el gen *p53* podría desempeñar un papel especial en el cáncer de piel no melanómico. Pero necesitábamos una confirmación sólida.

Para hallar esa prueba, estudiamos carcinomas de células escamosas, tumores de los que no hay duda de que están ligados a la exposición solar (se producen en las manos, sobre todo en personas de raza blanca que viven en los trópicos). En colaboración con Jan Pontén, del hospital clínico de la Universidad de Upsala, descubrimos que más del 90 por ciento de los carcinomas de células escamosas de un grupo de muestras recogidas en los Estados Unidos presentaban una mutación en algún punto del gen supresor de tumores *p53*. Estas mutaciones estaban situadas en lugares con bases pirimidínicas adyacentes y tenían el patrón distintivo del cambio de *C* por *T* característico de la exposición a los rayos ultravioleta.

Detectamos, y así también otros, la presencia de las mutaciones del *p53* relacionadas con la radiación solar en los carcinomas de células basales. (El melanoma no parece ir asociado con alteraciones del *p53*. Los expertos siguen estudiando melanocitos cancerosos en busca de genes afectados por la radiación solar.) Después de examinar las muestras de nuestro laboratorio, Annemarie Ziegler vio que la piel precancerosa sufría también mutaciones del gen *p53*, señal de que los cambios genéticos ocurren mucho antes de que se manifiesten los tumores. Pero, ¿eran estas mutaciones la causa real del cáncer no melanómico, o se trataba de un indicador irrelevante de la exposición solar a lo largo de la vida?

Podíamos descartar esta última posibilidad atendiendo al modo especial en que se había alterado el código genético. Los nucleótidos se disponen en los genes en codones bien definidos, y éstos son grupos de tres bases que especifican los distintos aminoácidos. La secuencia de codones en un gen determina la secuencia de los aminoácidos en una proteína. Ahora bien, un mismo aminoácido puede venir a veces especificado por codones diferentes. El aminoácido especificado no suele cambiar cuando las dos primeras bases del codón permanecen constantes y varía sólo la tercera. Por consiguiente, si las mutaciones del gen *p53* encontradas en el cáncer de piel se producían al azar por mor de la exposición al sol, cabía esperar que los cambios se registraran con igual frecuencia en la tercera posición que en la primera o la segunda. Dicho de otro modo: habría múltiples ejemplos en que el codón mutase (experimentase la sustitución de una base nucleotídica) sin que apareciera alterado su aminoácido correspondiente. Sin embargo, los estudios acometidos en distintos laboratorios sobre la función de este gen en los cánceres de piel habían resaltado la presencia persistente de mutaciones que condicionaban uno o más aminoácidos de la proteína p53. Estos cambios genéticos del *p53* no eran, por tanto, un efecto colateral de

la exposición a los rayos ultravioleta. Eran en efecto los causantes de los cánceres de piel.

Para ahondar en la forma en que el gen *p53* se alteraba en el cáncer de piel no melanómico, investigamos si había segmentos del gen *p53* especialmente proclives a la mutación de bases pirimidínicas adyacentes (es decir *C* o *T*) por la luz solar. Los biólogos han encontrado mutaciones de puntos "calientes" (lugares de una hebra de ADN donde se evidencia una tendencia mayor a la aparición de mutaciones) cuando esas células se exponen a agentes carcinogénicos. Tras analizar muchos tumores, llegamos a la conclusión de que el gen *p53* en el cáncer de piel no melanómico posee unos nueve puntos "calientes". En los cánceres no vinculados a la irradiación solar (cáncer de colon o vejiga), hay cinco codones del *p53* que mutan con mayor frecuencia, tres de los cuales se encuentran precisamente en puntos "calientes" en cánceres de piel. En los dos puntos "calientes" observados solamente en los otros cánceres, la *C* mutada está flanqueada a uno u otro lado por una *G* o por una *A*, pero nunca por una *T* o por otra *C*. Al carecer de un par de bases pirimidínicas, los sitios equivalentes en el ADN de la piel están protegidos contra las mutaciones inducidas por luz ultravioleta.

De los cientos de lugares del gen *p53* en que se dan pirimidinas adyacentes, ¿por qué sólo unos cuantos actúan como puntos "calientes" ante la exposición solar de las células? Varios expertos han contribuido a la resolución del problema, basados en cierto descubrimiento realizado hace más de treinta años por Richard B. Setlow y William L. Carrier, del Laboratorio Nacional de Oak Ridge. Setlow y Carrier determinaron que las células podían restañar la lesión del ADN producida por los rayos ultravioleta mediante un proceso enzimático de reparación por escisión. Las células se desprenden de las bases alteradas y las reemplazan por otras incólumes. En 1992, Subrahmanyam Kunala demostró en nuestro laboratorio que las células reparan con exasperante parsimonia la alteración de algunos pares de pirimidinas. Más tarde, el equipo de Gerd P. Pfeifer, del Instituto de Investigaciones Beckman en Duarte, California, observó que las células reparaban los puntos del *p53* mutados en el cáncer de piel no melanómico con morosidad mayor que en otros muchos sitios del gen. En consecuencia, parece bastante probable que los puntos "calientes" que hemos encontrado en el cáncer de piel deban su existencia a una incapacidad de las células de la piel para reparar de forma eficaz tales sitios.

Con nuestra identificación de las mutaciones pertinentes del gen *p53* no terminaba, por desgracia, la ominosa historia de la carcinogénesis. Después de todo, no son los genes los que adquieren cáncer, sino las células. Estaba bastante claro que la proteína p53 debe operar en las células normales de la piel para evitar el cáncer; pero, ¿cómo? Michael B. Kastan, del Hospital Johns Hopkins, nos dio una pista. Vio que las células sometidas a rayos X incrementaban la producción de proteína p53, lo que evitaba, a su vez, que las células se dividieran. Peter A. Hall y David P. Lane, de la Universidad de Dundee, y Jonathan L. Rees, de la Universidad de Newcastle, comprobaron un efecto semejante sobre la proteína p53 en células de la piel expuestas a la radiación ultravioleta. Se especula ahora sobre la posibilidad de que la proteína p53 suspenda la división de una célula con un ADN alterado mientras disponga de tiempo para efectuar la reparación.

El equipo de Moshe Oren, del Instituto Weizmann de Israel, ha propuesto también otra función de la proteína p53: puede evitar la aparición de cáncer en situaciones en que la magnitud del daño producido en el ADN impida restañarlo. Ha encontrado que el aumento de concentración de proteína p53 lleva a la apoptosis celular, a la muerte programada de la célula. (Esta muerte celular es algo normal en muchos procesos biológicos, incluido el desarrollo embrionario.) En este caso, el "suicidio" de una célula alterada evitaría que se convirtiera en cancerosa mediante la eliminación permanente de los errores genéticos. Viene a ser la apoptosis una suerte de corrección de pruebas. Considerando el desprendimiento rutinario de células de la piel, supusimos que éstas hacen tal uso del gen *p53*. Antes de que empezáramos a comprobar la solidez de nuestra hipótesis, se presentaron datos que la avalaban.

Los dermatólogos saben desde hace tiempo que, cuando las células de la piel se han expuesto al sol, algunas muestran el aspecto de células apoptóticas. Hacia 1994 pudimos demostrar que las células afectadas por la radiación solar contenían roturas en su ADN semejantes a las que aparecen en otras células

apoptóticas. Las células afectadas por los rayos solares parecían, pues, estar a punto de cometer un suicidio celular. Comenzamos a plantearnos si las células que habían perdido el *p53* podrían sufrir ese tipo de muerte.

Casi al mismo tiempo, el equipo de Tyler Jacks, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, había conseguido ratones que carecían del gen *p53*. Cuando Alan S. Jonason y Jeffrey A. Simon irradiaron la piel de estos roedores carentes del *p53* en nuestro laboratorio, encontraron muchísimas menos células apoptóticas afectadas por los rayos solares que en los ratones normales expuestos a la misma radiación ultravioleta. Los ratones en los que el gen *p53* se había inactivado sólo parcialmente presentaron también una moderada tendencia a sufrir el suicidio celular inducido por la luz. Estos resultados sugerían que la muerte celular programada era importante para evitar el cáncer de piel no melanómico y que la pérdida del *p53* podía bloquear el proceso.

Empieza ya a verse claro que un fallo en la revisión de pruebas que realiza la célula conduce a la manifestación del cáncer de piel. La piel normal expuesta a la luz del sol irá acumulando alteraciones en la molécula del ADN producidas por la luz ultravioleta B del espectro solar. Las células incapaces de reparar su ADN en el momento oportuno mueren por apoptosis. Pero si el gen *p53* de una célula ha mutado durante un episodio previo de exposición a la luz solar, esa célula resistirá a la autodestrucción, aun cuando el daño sea extenso.

La verdad es que la situación es mucho peor. Una célula a punto de sufrir una transformación cancerosa se halla rodeada por células normales que se autodestruyen cuando están lesionadas. Las células moribundas deben dejar espacio libre donde pueda multiplicarse la célula mutada en su gen *p53*. Al empujar a las células normales a la autodestrucción, la luz solar favorece la proliferación de las células que porten mutaciones en el *p53*. En efecto, la luz solar actúa dos veces para producir el cáncer: una para mutar el gen *p53* y otra para preparar las condiciones de un crecimiento desenfrenado de la línea celular alterada. Estas dos acciones, mutación y promoción del tumor, son los dos mazazos de la carcinogénesis. Aunque en otros tumores sean agentes separados los que llevan a cabo la mutación y la promoción, en el cáncer de piel la radiación ultravioleta parece ser responsable de estos dos golpes.

Existen otros genes implicados también en el desarrollo del cáncer de piel, así como otros efectos de la luz solar que los científicos sólo intuyen. Se sabe, por ejemplo, que el síndrome de Gorlin (una enfermedad en la que los pacientes tienen múltiples cánceres de células basales) se debe a una mutación heredada en un gen supresor de tumores diferente. Las investigaciones futuras nos ayudarán a comprender los diversos mecanismos de la carcinogénesis y podrán encontrar vías adecuadas para interrumpir la progresión de las células normales de la piel hacia la transformación cancerosa.

Es razonable pensar que el conocimiento que se está logrando acerca del cáncer de piel no melanómico abrirá la puerta a nuevos tratamientos. Tal vez los fármacos que restauren la función normal de una proteína p53 mutada permitirá a los médicos ofrecer a sus pacientes un remedio eficaz que no implique la intervención quirúrgica.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A ROLE FOR SUNLIGHT IN SKIN CANCER: UV-INDUCED P53 MUTATIONS IN SQUAMOUS CELL CARCINOMA. D. E. Brash, J. A. Rudolph, J. A. Simon, A. Lin, G. J. McKenna, H. P. Baden, J. A. Halper y J. Pontén en *Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A.*, volumen 88, número 22, páginas 10124-10128; 15 de noviembre de 1991.

SUNBURN AND P53 IN THE ONSET OF SKIN CANCER. A. Ziegler, A. S. Jonason, D. J. Leffell, J. A. Simon, H. W. Sharma, J. Kimmelman, L. Remington. T. Jacks y D. E. Brash en *Nature*, vol. 372, págs. 773-776; 22-29 de diciembre de 1994.

CANCER FREE: THE COMPREHENSIVE CANCER PREVENTION PROGRAM. Sidney J. Winawer y Moshe Shike. Simon & Schuster, 1996.

SUNLIGHT, ULTRAVIOLET RADIATION AND THE SKIN. NIH Consensus Statement, vol. 7, n.º 8, págs. 1-29; 8-10 de mayo de 1989. Disponible en http://text.nlm.nih.gov/nih/cdc/www/74txt.html.

Ciencia en el firmamento

Tim Beardsley

"¡Sobre la vida en la Tierra!", exclama un reclamo publicitario de la Estación Espacial Internacional, el laboratorio orbital que está tomando forma en la fábrica de la Boeing en Huntsville, Alabama, en los talleres Khrunichev de Moscú y en otros puntos repartidos por el globo. No se habrán dicho seguramente palabras más veraces sobre este monstruo del espacio —400 toneladas de peso, 27.000 millones de dólares de coste—, que tras doce años de rediseños, revisiones y votaciones prendidas de alfileres parece, por fin, soltar amarras.

El brillante porvenir de la estación espacial tiene que ver más con la política en la Tierra que con su potencial científico en el espacio. Los promotores de la estación llevan años sosteniendo que la investigación en órbita generará enormes beneficios científicos y comerciales. Pero los logros científicos, tras más de una década de experimentos realizados en condiciones de ingravidez en los vuelos espaciales, aunque a veces sean muy sugestivos, no han supuesto un progreso fundamental. Los comités científicos, como la junta de estudios espaciales del norteamericano Consejo Nacional de Investigación, han advertido que, si bien será factible desarrollar algunos trabajos de investigación en la estación, los beneficios que se esperan no justifican en modo alguno el coste global de la instalación.

El interés comercial también es tibio, pese a que la NASA ha ofrecido jugosos incentivos a las empresas para que investiguen y fabriquen productos de técnica avanzada en el espacio. Hasta la fecha ninguna compañía importante proyecta hacer una cosa o la otra a una escala importante. James Ferris, del Instituto Politécnico de Rensselaer, insiste en que "no ha salido nada de las investigaciones efectuadas en condiciones de microgravedad que me haya convencido de que pueda fabricarse en órbita un material mejor que los que puedan prepararse en la Tierra".

Daniel S. Goldin, administrador de la NASA, reconoce tácitamente estas críticas cuando expone cuál es la justificación oficial del proyecto. Después de todo, la ciencia y el comercio no son las razones que explican la construcción de la estación. Goldin declama que "la estación espacial se está construyendo para comprobar si las personas pueden vivir y trabajar de forma segura y eficaz en el espacio". Y añade, como si volviese sobre sus ideas, que "podemos hacer una ciencia asombrosa" en campos tan dispares como la biotecnología o el procesado de materiales, pero "ésa no es la razón última".

Por qué exactamente necesita el mundo saber si las personas pueden vivir y trabajar en el espacio es una cuestión que Goldin esquiva. No obstante, a los ministros de Europa y Rusia se les ha seducido y amedrentado para que se comprometan a aportar fondos que respalden su parte de la estación, atraídos por la perspectiva de crear empleos para los trabajadores de la industria de defensa y atar lazos pacíficos entre los antiguos rivales geopolíticos. La Cámara de Representantes de los EE.UU., que apenas hace tres años no rechazó el proyecto por un solo voto, acaba de aprobar que se gasten 2100 millones de dólares anuales para que la estación esté terminada en junio del 2002.

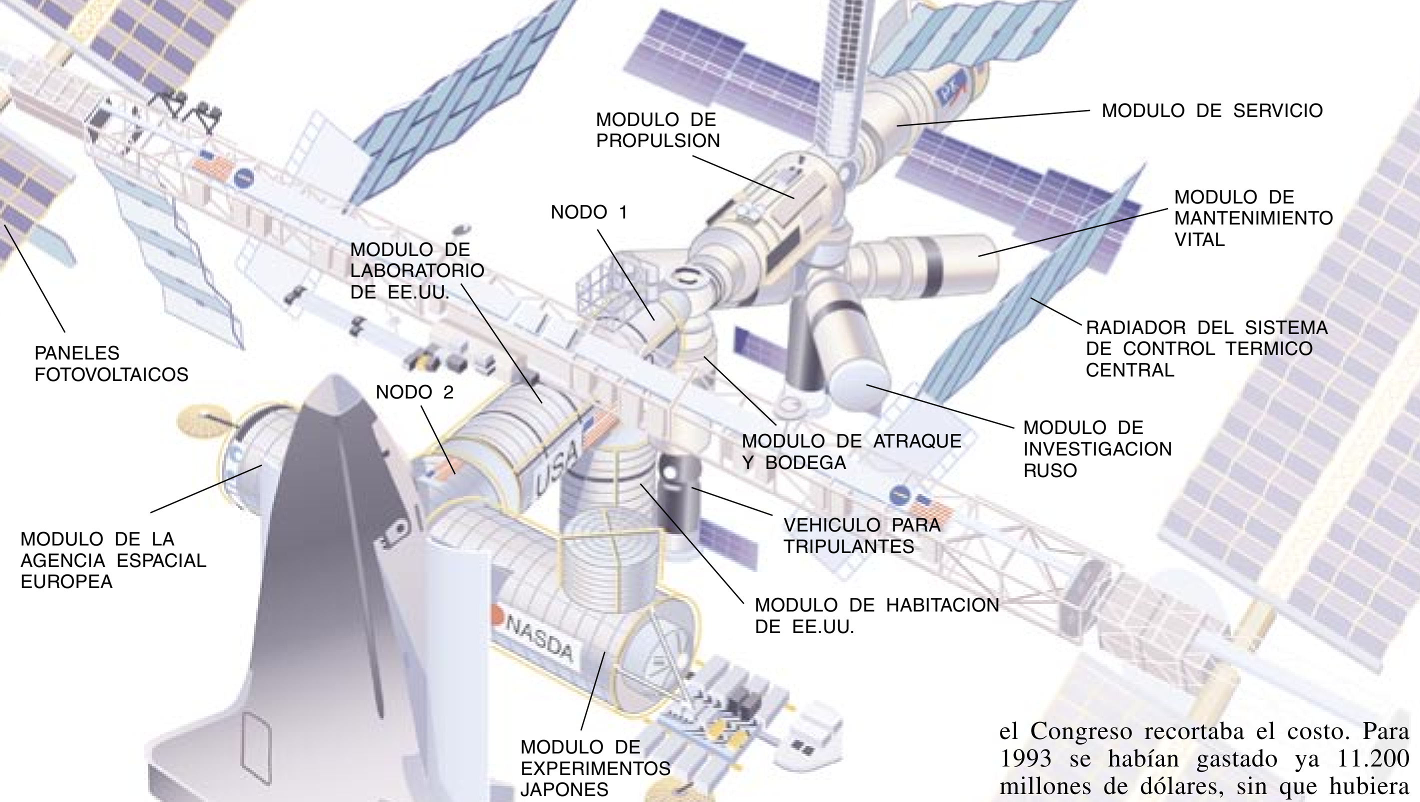
Son muchos los investigadores que temen que la estación esté esquilmando los fondos destinados a la ciencia en un momento nada boyante para los presupuestos de investigación en el mundo entero. La NASA habla de



1. ESTACION ESPACIAL, representada tal como será cuando esté terminada en junio del 2002 y gire alrededor de la Tierra a 400 kilómetros de altura.



La Estación Espacial Internacional será el objeto más caro que se haya construido jamás. Aunque muchos científicos se oponen a ese proyecto faraónico, su impulso político es ya imparable



2. UNA GRAN CANTIDAD de componentes —procedentes de EE.UU., Rusia, Japón, Canadá y Europa— compondrán la estación espacial. El tinglado central sostendrá los paneles solares que generan energía y los radiadores para deshacerse del calor sobrante.

un precio global de 17.400 millones. Además, los socios internacionales contribuirán con algo más de 9000 millones, excluyendo la contribución de Rusia. Hay que tener en cuenta, además, que los lanzamientos de los transbordadores durante la fase de construcción de la estación y para el suministro de provisiones supondrán un aporte adicional de 19.600 millones hasta el año 2002 y otros 46.000 millones de dólares de ahí en adelante, según la Oficina General de Cuentas (GAO).

Sumado todo, las cifras de la GAO no dejan lugar a dudas de que la estación se tragará más de 100.000 millones de dólares mientras permanezca operativa, período cifrado en unos 10 años. Aun así, no existen repuestos para los componentes principales de la estación. De perderse uno en un accidente o si una Rusia cada vez más nacionalista abandonase la coalición, los costes aumentarían todavía más y las fechas propuestas se retrasarían algunos años. El presupuesto de la NASA para investigación y desarrollo durante el año 1995, 9500 millones, hinchado por la estación espacial, representa un 40 por ciento de lo asignado a investigación y desarrollo del país, excluidas las partidas de sanidad y defensa. “Me preocupa que la estación espacial represente una carga excesiva, razón de más para reflexionar sobre las fuentes de la financiación de la investigación y el desarrollo nacionales”, afirma Louis J. Lanzerotti, físico de los Laboratorios Bell de la AT&T y antiguo presidente de la junta de estudios espaciales.

Salvo un cambio de opinión de última hora en el Capitolio, o un parón técnico, el primer componente de la estación espacial, el módulo de propulsión de fabricación rusa, se lanzará en noviembre de 1997 desde el cosmódromo de Baikonur, en Kazakhstan, con un cohete Protón. Cuando el presidente Ronald Reagan invitó a los aliados de EE.UU. a participar en la construcción de un laboratorio espacial, habría sido impensable, era 1984, que el lanzamiento fuese cosa de los rusos. La guerra fría seguía helada, y, por lo que se refería a Moscú, el objetivo era la contención, no la colaboración.

Pero el desastre del *Challenger* en 1986 obligó a que se replantease radicalmente el diseño de la estación, y el precio fijado de 8000 millones de dólares pronto aumentó vertiginosamente. Después de que en 1988 Reagan le diese al proyecto el nombre de *Space Station Freedom*, Estación Espacial Libertad, el diseño fue cambiando cada año a medida que el Congreso recortaba el costo. Para 1993 se habían gastado ya 11.200 millones de dólares, sin que hubiera ni un lanzamiento.

Al empezar su mandato la administración Clinton examinó sin contemplaciones el proyecto, modificó el diseño una vez más y decidió ahorrar fondos y hacer de Rusia un aliado estratégico otorgándole un papel principal en el programa. Los cohetes rusos registran buenos índices de seguridad, y ese país tiene ya una experiencia de diez años con su estación espacial *Mir*. El plan actual, que durante cierto tiempo se conoció con el nombre de *Alpha* y ahora, sencillamente, lleva el de Estación Espacial Internacional, encarga a Rusia la construcción de tres de los cuatro primeros módulos, incluido el más que importante de propulsión. Esta unidad, que EE.UU. le compra a Rusia, mantendrá a la estación en su trayectoria a 400 kilómetros sobre la Tierra.

La iniciativa unilateral de EE.UU. de invitar a Rusia a formar parte de los escogidos causó consternación en Europa. Tras una intensa actividad diplomática, en el mes de octubre pasado los ministros europeos votaron a favor de continuar con el nuevo plan. Europa contribuirá con un módulo de experimentos y negocia en estos momentos con EE.UU. su cooperación en un vehículo para el retorno de la tripulación en caso de emergencia. Canadá proporciona un brazo manipulador robótico, parecido al que está instalado en el transbordador, y Japón construirá un módulo de experimentos.

Es posible que la estación espacial sea una obra maestra del diseño funcional, pero parece la pesadilla

de un arquitecto. Del módulo de propulsión brotará el ala rusa, con su propio módulo de laboratorio, sus habitáculos, sección de atraque y sistema de energía; los módulos estadounidenses de laboratorio y habitación; un entramado que sostiene 16 placas solares y el brazo robótico; y, por último, los módulos de laboratorio europeo y japonés. El montaje de este desgarbado híbrido, que en tierra cubriría catorce canchas de tenis, llevará cinco años, y harán falta 44 lanzamientos de transbordadores espaciales estadounidenses y cohetes europeos, japoneses y rusos. Una vez concluido el proceso de montaje, el complejo admitirá una tripulación de seis personas, que disfrutarán de un espacio presurizado equivalente a las cabinas de pasajeros de dos aviones *Jumbo*.

De la parte estadounidense se encarga un solo contratista, Boeing, con dos subcontratistas, Rocketdyne y McDonnell Douglas. En marzo se moldeaban y equipaban los módulos de laboratorio y habitación estadounidenses, unos cilindros de aluminio de unos 8 metros de largo y 4 metros de ancho, en los edificios de ensamblaje de la Boeing en el Centro de Vuelo Espacial Marshall de la NASA, en Huntsville. El modelado de las superficies de conexión que acoplarán los módulos a las unidades adyacentes se comprobó, mediante equipos de medición por rayos láser, con una precisión de medio milímetro. La exactitud es esencial para minimizar las fugas de aire. Los transbordadores llevarán muchos de los suministros de la estación espacial hasta su órbita —el aire, por ejemplo, que respirarán los astronautas—, lo que cuesta entre 10.000 y 20.000 dólares por cada medio kilo de carga útil.



3. COLOCACION de una escotilla en la posición que le corresponde (*derecha*) sobre uno de los "nodos" de conexión de la estación espacial en el edificio de ensamblaje que tiene la Boeing en el Centro de Vuelo Espacial Marshall de la NASA, en Huntsville. Terminada la soldadura, una grúa levanta la estructura principal del módulo del laboratorio estadounidense (*abajo*), de 13.200 kilogramos de peso. El módulo se moldeará luego y se le revestirá de una camisa de kevlar para aislarlo de los residuos espaciales.

Los funcionarios de la NASA aseguran que la colaboración con sus homólogos extranjeros es óptima. Pero algunos de los equipos que planifican las instalaciones de investigación de la estación admiten que es especialmente difícil trabajar con los rusos, quienes aún no participan de lleno en la planificación científica conjunta de la estación. Las investigaciones médicas rusas no han impresionado a los expertos de la NASA; dicen que carecen de rigor estadístico. En el bando estadounidense hay quienes se quejan de que la escasez de fondos para la ciencia en Rusia lleva a los investigadores rusos a la búsqueda constante de arreglos económicos para que la inversión de su país sea la menor posible. Pese a todo, los vuelos de los transbordadores estadounidenses a la estación *Mir* están desbrozando el camino que conduzca a mejorar las relaciones científicas.

El año pasado varios altos cargos de la ciencia espacial rusa sorprendieron a la NASA al proponer un plan que reducía su participación; sugirieron que, durante los próximos años, los socios internacionales modificasen la ya existente estación *Mir*. La NASA consiguió abortar ese plan rápidamente, pero el pánico que se desencadenó dio a los rusos la fuerza necesaria para renegociar el complejo acuerdo que mantienen con sus socios de la estación espacial. La NASA había acordado con anterioridad efectuar varios vuelos de transbordador para llevar suministros a la estación *Mir*. Rusia pidió un vuelo más. Y lo consiguió.

Esta primavera hubo un reajuste de la secuencia de ensamblaje; la puesta en órbita del módulo japonés y de una unidad de centrifugado se ha retrasado varios meses. Ahora no se lanzará el módulo europeo hasta el 2003, vencida la fecha oficial de finalización del montaje. "Tendremos que ser flexibles", afirma Wilbur C. Trafton, director de vuelos espaciales de la NASA.

Aunque el susto del año pasado se ha superado ya, fuentes de la industria rusa han venido indicando desde entonces a los responsables de la NASA que el gobierno de su país está demorando la financiación del tercer componente de la estación, el módulo de servicio. Según Trafton, la NASA ha "recibido ahora garantías de los rusos de que el proyecto tendrá todos los fondos necesarios". Sin embargo, puede palparse la ansiedad que las dudas acerca de la fiabilidad de los rusos causan. En marzo, el vicepresidente Al Gore escribió, en tono firme, una carta al primer ministro Viktor Chernomyrdin advirtiendo que si Rusia no proporcionaba todos los fondos necesarios para financiar su parte de la estación, los detractores del proyecto en el Congreso estarían todavía a tiempo de decidir que la colaboración concluyese.

Es probable que la estación logre superar esta última crisis política, pero son muchos los que albergan grandes dudas sobre el proyecto. El diseño del armamentario científico a instalar en los módulos de laboratorio cuando éstos se hallen ya en órbita se encuentra en estos momentos en distintos estadios de desarrollo. Varios grupos de expertos aconsejan acerca de las instalaciones que atraerían a los investigadores. Sin embargo, el enorme tiempo requerido para diseñar y afinar los instrumentos espaciales —hasta siete años— mengua el entusiasmo de los científicos, ansiosos por permanecer en la vanguardia de sus especialidades.

La planificación de las instalaciones científicas se va al traste cada vez que se alteran los plazos para el ensamblaje de la estación; los

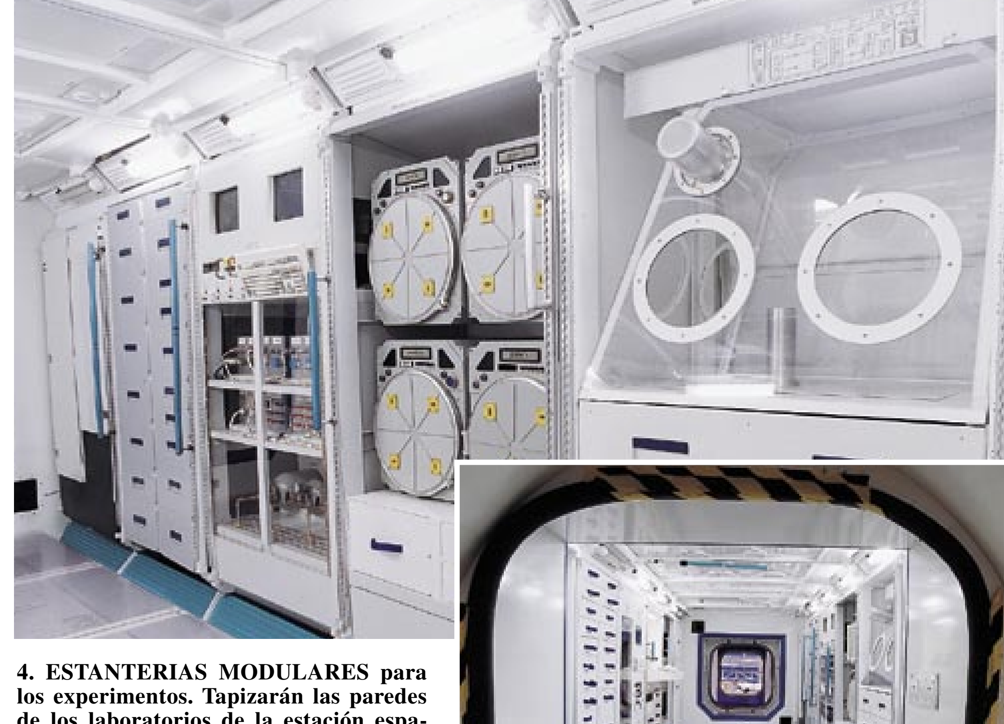
instrumentos enviados en un vuelo resultarían inservibles si faltase algún componente cuyo lanzamiento se estableciera para un momento posterior. No hay todavía respuesta para algunas preguntas: cuánto tiempo podrán dedicar los miembros de la tripulación a la investigación o cuál será la magnitud de las vibraciones durante los cinco años de ensamblaje.

La estación se ideó al principio, en parte, como una plataforma para el estudio a distancia de la Tierra; la NASA sigue alardeando de que la órbita de la estación, que cubre más superficie terrestre de lo que habría hecho la *Freedom*, "proporciona un observatorio excelente de la Tierra". Pero no existe ahora ningún plan para el estudio de la superficie terrestre desde la estación: los movimientos de la tripulación la agitarán demasiado para que las medidas sean precisas, y la nube de gases que emitirá la seguirá en su órbita y hará de ella una atalaya mediocre para el estudio del entorno espacial.

Por eso se pone mayor énfasis en el estudio de los efectos de la ingravidez en los seres humanos y en los procesos biológicos y físicos. Trafton dice que se está construyendo un "laboratorio de primera clase mundial" para explorar la microgravedad. (Aunque no haya vibraciones, cabe acercarse a la ingravidez orbital sólo en un "punto dulce", el centro de masas de la estación; en cualquier otra parte la gravedad se mide en millonésimas de la terrestre y de ahí la palabra "microgravedad".)

Se ha constituido un fondo especial de 2600 millones de dólares que respalda la investigación en la estación espacial. Un folleto de la Boeing afirma que "la investigación en microgravedad... pondrá los cimientos de grandes avances de la medicina, la alimentación, la seguridad, las comunicaciones, los transportes y el medio ambiente. El programa creará en los Estados Unidos, directamente, decenas de miles de empleos en industrias de técnica de punta, y otros miles en actividades derivadas, mejorando de esa forma la competitividad de la nación".

En la década de los ochenta la NASA ganó partidarios tanto para la estación como para el transbordador cantando las posibilidades que le abrían al procesado comercial de materiales. El fenómeno que mejores perspectivas de explotación ofrecía era el crecimiento cristalino. Sucede más despacio en microgravedad porque se reducen mucho los flujos de convección. Por ello se forman con mayor perfección en el espacio los cristales de ciertas sustancias, de las proteínas en especial; así, los datos que se obtienen al estudiarlas por rayos X sobre su composición son mejores, gracias a lo cual podría facilitarse el diseño de fármacos que actúen sobre las proteínas del cuerpo humano. También suscitó mucho interés el que haya fuerzas, como la tensión superficial, que afectan intensamente a los líquidos en condiciones de microgravedad, porque sugiere que ésta podría venir bien para la separación de mezclas de materiales. La microgravedad también parece beneficiosa cuando se quieren crear capas muy finas de polímeros o de semiconductores.



4. ESTANTERIAS MODULARES para los experimentos. Tapizarán las paredes de los laboratorios de la estación espacial, como en este modelo del módulo de los EE.UU. Una de las paredes es un "techo" arbitrario, rodeado de luces para ayudar a los astronautas a orientarse en condiciones de microgravedad.

Durante los últimos diez años la NASA ha proporcionado fondos a los Centros de Desarrollo Comercial del Espacio, unidades de investigación repartidas por todo el país que ayudan a las empresas a preparar proyectos que vuelen en el transbordador. La idea inicial era que fuesen autosuficientes pasados cinco años, pero los centros siguen alimentándose de los fondos de la NASA, con un gasto de unos 15 millones de dólares al año. La NASA también ofrece espacio gratuito en sus lanzamientos, lo que ha empujado a muchas empresas aventureras a realizar experimentos. La NASA confía en que en el futuro estas compañías estén dispuestas a afrontar la totalidad de los costos y hacer uso de las instalaciones disponibles en la estación espacial, de mayores dimensiones, y donde los experimentos se podrán prolongar más de las dos semanas que dura el vuelo de un transbordador espacial.

Sin embargo, los centros comerciales de la NASA reciben críticas porque los experimentos que ponen en órbita no son evaluados por expertos imparciales. Robert F. Sekerka, de la Universidad Carnegie Mellon, quien presidió un estudio sobre la investigación de la microgravedad para el Consejo Nacional de Investigación, dice que los experimentos, mientras vuelen por el espacio con fondos públicos, deberían someterse a un escrutinio independiente.

Lawrence J. DeLucas, director de un centro comercial de la Universidad de Alabama en Birmingham especializado en el crecimiento de cristales de proteína en condiciones de microgravedad, replica que los centros comerciales imponen sus propios criterios empresariales. "Hemos realizado muestras para multitud de compañías." Agrega que "les ayudamos a diseñar el fármaco, y como compensación ellos nos hacen partícipes de una parte de los derechos de patente". Hasta el momento, sin embargo, la mayor parte de lo recibido han sido "contribuciones en especie", que comprenden el valor de las muestras de la empresa.

Parece existir poca discrepancia sobre la mejora operada por la NASA en la calidad de los programas científicos que ha desarrollado durante los últimos años. "Todos los campos de investigación de la NASA han aceptado la revisión rigurosa por expertos desde hace ya bastante tiempo", explica John David F. Bartoe, gerente de las investigaciones en la estación. El escepticismo sobre los trabajos científicos en la estación espacial se debe principalmente a las dudas de si los beneficios podrán compensar un gasto tan extraordinario.

Gregory K. Farber, de la Universidad estatal de Pennsylvania, que investiga el crecimiento de cristales de proteína en la Tierra, reconoce que algunos de los cristales complejos desarrollados en el espacio son mayores o proporcionan mejores datos de rayos X que los generados en los laboratorios terrestres. Pero, según Farber, habrán de llevarse a cabo docenas de pruebas para descubrir cuáles son las condiciones óptimas para el crecimiento de cada cristal, por lo que un solo ejemplar supone una inversión en torno al millón de dólares. "¿Qué habríamos logrado si hubiéramos empleado ese dinero en mejorar el crecimiento de cristales en la Tierra?", se pregunta. Y Eric Cross, un experto en materiales de la misma universidad, señala que "el éxito conseguido en el crecimiento de cristales simples en la Tierra ha sido asombroso".

La puesta en órbita de cualquier cosa hincha hasta tal punto el presupuesto, que ha apagado mucho el entusiasmo por la fabricación en el espacio. Algunos emporios empresariales han desechado la idea después de haber estado interesados en ella. La compañía 3M, a la que se le suele reconocer que es una de las empresas de materiales más imaginativas, se entusiasmó ante la posibilidad de fabricar películas y polímeros en condiciones de microgravedad, pero tiró la toalla hace varios años.

Schering-Plough, fabricante de interferón alfa, una proteína utilizada en el tratamiento de la hepatitis, entre otras enfermedades, fue un rayo de esperanza para la manufactura espacial. Un artículo publicado en 1996 por Paul Reichert y Tattanahalli L. Nagabhushan, del Instituto Schering-Plough de Investigación, y otros describe cómo una forma microcristalina de interferón fabricada en un vuelo del transbordador espacial permaneció en la circulación sanguínea de unos monos varias horas más que el interferón que se usa actualmente; es posible que sea ventajoso en terapéutica. DeLucas aclara que con tan sólo cuatro frascos de dicha sustancia podría abastecerse su demanda anual, que asciende a 750 millones de dólares.

Pero Nagabhushan, vicepresidente de biotecnología de la Schering-Plough, reitera que no tiene pensado acometer nuevas investigaciones sobre

¿Vale la pena construir la estación espacial?

	PROS/CONTRAS	ESTADO ACTUAL
PRODUCTOS DE TECNICA AVANZADA	La microgravedad permite explorar procesos inéditos No se han encontrado productos que justifiquen los costes —entre 10.000 y 20.000 dólares— cada medio kilo de carga de lanzamiento del transbordador	Las grandes compañías no están interesadas en estos momentos en la fabricación espacial
ASTRONOMIA; DETECCION TERRESTRE A DISTANCIA	La visión clara por encima de la atmósfera terrestre es buena tanto para la astronomía como para los estudios ambientales La estación se mueve demasiado para las mediciones de alta precisión	No existe ningún proyecto de investigación
MECANICA DE MATERIALES Y FLUIDOS	Se sabe que suceden multitud de fenómenos de interés en condiciones de microgravedad Aviones con trayectorias parabólicas y naves espaciales automatizadas pueden ya lograr mucho, con un coste mucho menor	La NASA y sus socios se proponen realizar experimentos
DESARROLLO DE PLANTAS Y ANIMALES	Debido a su larga duración, muchos experimentos sólo se pueden llevar a cabo en una estación espacial Falta por demostrar que los resultados revistan algún interés	La NASA y sus socios se proponen realizar experimentos
BIOTECNOLOGIA (crecimiento de cristales de proteína y cultivos celulares)	Algunos cristales se desarrollan mejor en condiciones de microgravedad; las células crecen de forma diferente Se han obtenido avances importantes con técnicas terrestres	La NASA y sus socios se proponen realizar experimentos. El interés comercial se limita a la investigación subvencionada
EPITAXIA DE HAZ MOLECULAR (EHM)	El vacío en la estela de una nave espacial es superior al que se consigue en la Tierra; es factible la fabricación de productos de alto valor Los gases próximos a la estación impiden la EHM en 80 kilómetros	La NASA ha asignado a este campo una función secundaria; sin interés comercial
VIDA Y TRABAJO DE LAS PERSONAS EN EL ESPACIO	En la estación pueden realizarse observaciones a largo plazo; es posible que se obtengan descubrimientos médicos fortuitos Las respuestas sólo serían importantes si hubiera en proyecto otra misión de larga duración, por ejemplo una a Marte	La NASA ahora dice que es la misión principal de la estación



5. EL COSMONAUTA Gennady Strekalov toca para tres astronautas norteamericanos durante un acoplamiento de la *Mir* y la lanzadera el pasado año.

El peso del vivir sin gravedad

La vida en la estación espacial no será precisamente una excursión al campo. Cuando el astronauta Norman Thagard regresó a la Tierra el año pasado tras 110 días en órbita con una tripulación de nacionalidad rusa a bordo de la *Mir*, señaló que "el aislamiento cultural fue extremo". Queda por ver si rusos y estadounidenses lograrán trabajar bien juntos durante meses en el ambiente aún más difícil de una estación espacial en construcción. Una buena política será crucial: el primer comandante de la estación, William M. Shepherd, tendrá a sus órdenes a dos cosmonautas rusos en lo que será, al principio, una nave espacial exclusivamente rusa.

Un programa sometido a un riguroso control puede crear una asfixiante presión psicológica. En un famoso incidente ocurrido durante una misión *Skylab* en 1973, los astronautas se rebelaron contra el responsable de la misión, que les parecía demasiado exigente. La productividad creció cuando se otorgó mayor autonomía a los tripulantes.

La NASA se propone ser más flexible con los astronautas de la estación espacial de lo que acostumbra con la tripulación de los transbordadores, lo que acercará su manera de proceder a las prácticas rusas. Para que la sensación de aislamiento de la tripulación de la estación sea menor, la NASA pondrá instalaciones para realizar llamadas telefónicas personales.

Una parte importante del día se tiene que dedicar a hacer ejercicio, intentando contrarrestar los efectos de la ingravidez prolongada. Los planificadores del Centro Espacial Johnson, de Houston, están seleccionando aparatos de ejercicios que eviten vibraciones.

Queda pendiente aún la cuestión del vodka que acostumbran beber los cosmonautas rusos y el gusto de los europeos por el vino de crianza. La NASA no permite llevar alcohol al espacio, pero ¿qué sucedería si a los astronautas de los EE.UU. se les invitara al ala rusa o al laboratorio europeo para tomarse una copa?

---

el interferón microcristalino a bordo de la estación espacial. Los cristales desarrollados en el espacio "no fueron tan diferentes como para hacernos saltar de alegría", y añade que no conoce en la industria farmacéutica a nadie que proyecte elaborar algún producto en el espacio.

Otra idea comercial para el espacio es la epitaxia de haz molecular, una técnica utilizada para producir láminas delgadas monocristalinas de semiconductores. El método ha sido investigado durante los últimos años en el Centro de Epitaxia Espacial al Vacío, uno de los centros comerciales de la NASA, radicado en la Universidad de Houston. Se basa, más que en la microgravedad, en el elevado nivel de vacío existente en la estela de un satélite en órbita. Un reciente vuelo de transbordador demostró que se pueden construir en órbita capas de semiconductores puros tras una pantalla especial.

Sin embargo, una instalación para la epitaxia de haz molecular orbital no podría funcionar a menos de 80 kilómetros de la estación espacial a causa de la nube de gas que la rodearía, y por el momento el centro de Houston no ha logrado persuadir a ningún empresario de que financie la investigación sobre la epitaxia en el espacio. La junta de estudios espaciales del Consejo Nacional de Investigación, en una resolución inusualmente tajante, concluyó el año pasado que "descarta que se produzcan capas epitaxiales en el espacio".

Incluso cuando la investigación espacial identifica un fenómeno inédito, no puede asegurarse el interés comercial. Randall M. German, experto en materiales de la Universidad estatal de Pensilvania, afirma que los estudios que ha realizado en el transbordador acerca de las sinterizaciones en fase líquida de aleaciones de tungsteno dieron como resultado unos descubrimientos sorprendentes que han abierto una inesperada línea de investigación. Pero German no está convencido de que la estación espacial sea capaz de ofrecerle posibilidades científicas diferentes de las que aporta el transbordador y no prevé ningún interés comercial "a corto plazo".

Las únicas empresas comerciales que todavía hablan de hacer algo en el espacio son participantes menores en el proyecto. Krist Jani, de Paragon Vision Sciences, de Arizona, se confiesa un entusiasta de la fabricación de mejores lentes de contacto permeables en el espacio. En abril, Paragon sólo había realizado dos experimentos a bordo de la lanzadera, uno de los cuales no funcionó; la producción, pues, cae un poco lejos todavía. La empresa Coca-Cola ha realizado experimentos sobre cómo servir bebidas gaseosas en el espacio. Pero un asesor de la firma que hizo una presentación en la NASA a principios de este año admitió con toda franqueza que la compañía sólo persigue un efecto publicitario.

Aunque la fabricación en el espacio sea un fiasco, hay empresas orientadas a la investigación que siguen siendo optimistas y creen aún que la microgravedad podría enseñarles a hacer en tierra firme las cosas mejor. Gracias al sondeo con rayos X de los cristales de insulina desarrollados en el espacio, G. David Smith, del Instituto Hauptman-Woodward de Investigación Médica de Buffalo, Nueva York, ha tomado unas imágenes con una resolución sin precedentes de complejos formados entre insulina y un posible medicamento para la diabetes. Estas imágenes podrían servir de guía a los químicos que andan tras el diseño de mejores fármacos. Howmet, una compañía de Michigan, quiere estudiar cómo fluyen los metales líquidos en condiciones de microgravedad; esperan así refinar sus modelos computarizados del proceso de fundición.

Daniel C. Carter, experto de la NASA en cristales de proteína adscrito al Centro de Vuelos Espaciales Marshall, asesora a varias compañías sobre el crecimiento de cristales de proteína de interés médico. La lista comprende una enzima del virus del sida cristalizada por un medicamento, una proteína producida por un oncogén y una proteína de la coagulación sanguínea. Al menos un 38 por ciento de las proteínas cristalizan mejor en condiciones de microgravedad, según sostiene este investigador, y con la ayuda de aparatos más modernos y refinados capaces de controlar la temperatura, esa proporción se acercará al 100 por cien.

El estudio de la combustión constituye otro capítulo notable de la inves-

tigación programada para la estación espacial. Los materiales arden de una forma completamente diferente en la microgravedad debido a la ausencia de corrientes convectivas: la llama de una vela, por ejemplo, es esférica y se apaga rápidamente. Según argumenta Robert Rhome, de la NASA, si los estudios básicos sobre combustión nos enseñasen a aumentar el rendimiento de los automóviles o las centrales eléctricas, las consecuencias económicas serían impresionantes. Por el momento, sin embargo, es la NASA la que muestra un mayor interés en las aplicaciones prácticas, en concreto en las que tienen que ver con la seguridad de las naves espaciales.

El número de fenómenos que podrían estudiarse en condiciones de microgravedad es enorme, pero Cross advierte que en el interior de la estación espacial será imposible alcanzar las bajas temperaturas y los niveles de vacío que se consiguen de forma habitual en los laboratorios terrestres.

Las vibraciones producidas por el equipo y la tripulación en la estación espacial limitarán aún más las posibilidades de hacer ciencia de precisión, dice Cross, pese a los esfuerzos de la NASA por crear aparatos resistentes a las vibraciones. Cross, que ha diseñado utillaje espacial y un experimento orbital, afirma que las oportunidades de investigar materiales en la estación no le impresionan "ni lo más mínimo". Los críticos argumentan que podrían investigarse el sorprendente comportamiento de los líquidos en ausencia casi total de gravedad y algunos de los efectos biológicos con naves espaciales robóticas diseñadas para fines específicos con un costo muy inferior al de la estación espacial.

La biología se ha vuelto un foco de creciente interés para quienes desean explorar las posibilidades que ofrece la estación espacial. Los resultados de los experimentos realizados en los transbordadores indican que la microgravedad ejerce una influencia importante en el desarrollo de plantas y animales. El crecimiento celular en los cultivos es diferente, y existen indicios de que podría ser más sencillo producir tejidos humanos. Las plantas depositan menor cantidad de lignina, un material estructural; a tenor de cierto resultado, las bacterias podrían dividirse un 50 % más rápido en la microgravedad, lo que "si fuese cierto sería asombroso", comenta Maurice M. Avernet, microbiólogo de la NASA.

Los resultados obtenidos hasta el momento son escasos debido a que la experimentación con animales y plantas requiere una gran dedicación por parte de los astronautas. Joan Vernikos, que dirige la sección de biología de la NASA, afirma que las instalaciones diseñadas para la estación espacial, de prestaciones superiores, permitirán repetir y modificar los experimentos biológicos con mucha más facilidad que a bordo del transbordador espacial. Además, un dispositivo de centrifugado que hace girar jaulas de animales permitirá estudiar por primera vez los efectos de distintos niveles de gravedad sobre los organismos en desarrollo. (El recurso a la centrífuga es un aspecto controvertido de la estación espacial, puesto que creará vibraciones.)

Sin embargo, de las nuevas áreas de investigación pensadas para la estación, en la que se ha insistido más ha sido la de la salud. El cuerpo humano se ve afectado por la ausencia de gravedad más seriamente de lo que cabe suponer cuando se ven los divertidos juegos que se televisan desde el transbordador. Los huesos pierden calcio, los músculos se atrofian, los niveles de inmunidad pueden disminuir. La investigación médica sobre los astronautas en la estación se efectuará en una sección especial que cuenta con instrumentos para pesarlos (tarea nada trivial sin gravedad), medir su fuerza muscular y analizar su sangre y los gases espirados, entre otros signos vitales.

Pero Elliott C. Levinthal, antiguo director de programas de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de la Defensa, que trabajó en las misiones robóticas *Viking* a Marte y ha sido profesor de genética e ingeniería mecánica en la Universidad de Stanford, ha cuestionado el valor de la investigación en órbita en los campos de la biología y la medicina. Levinthal sostiene que ningún comité neutral responsable de aprobar fondos públicos destinados a la investigación básica en biología apoyaría los estudios relativos a la microgravedad y argumenta que dar prioridad a tales investigaciones sólo sería admisible si la estación espacial estuviese construyéndose con vistas a prepararse para otra misión de larga duración.

A ello responde la NASA que los seres humanos querrán ir a Marte algún día. Levinthal insiste, sin embargo, en que la construcción de la estación espacial es prematura incluso aunque se desee, en última instancia, visitar el planeta rojo. Aduce que mucho antes de que los astronautas pudieran realizar un viaje tan peligroso —y mucho más caro que la estación espacial— se tendría que enviar primero naves no tripuladas que explorasen detalladamente el planeta y recogieran muestras de su superficie. Esa exploración podría llevar muchos años.

Levinthal también tiene dudas sobre el supuesto propósito de la estación espacial de mantener a los técnicos rusos en puestos de trabajo pacíficos. Dice que los científicos de ese país seguramente preferirían invertir los rublos destinados a la investigación en trabajos más a ras del suelo. Los EE.UU. podrían aliviar en Rusia las tasas del paro gastándose mucho menos de lo que cuesta la estación espacial; les bastaría enviar dinero para la investigación. Levinthal admite que los políticos rusos están apresados en la misma trampa que los estadounidenses: han hecho suyos los vuelos espaciales tripulados como símbolo de prestigio técnico y temen la ira en la cabina de votación de los trabajadores de la defensa desempleados. No obstante, Levinthal concluye que la estación espacial carece de sentido.

Parece que los científicos sólo pueden elegir si harán o no uso de un laboratorio de microgravedad único en su especie que será construido con o sin su aprobación. Y mientras existan becas, los investigadores sin duda encontrarán algo que hacer en la preciada instalación. "La razón por la que la estación tuvo dificultades en su origen fue que no dejásemos de discutir sobre ella", dice el jefe de la NASA Goldin. "Ya no es un tema que se pueda discutir. Decimos no a que se rediseñe y no a que se le hagan cambios. Vamos a construir la estación espacial."

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MICROGRAVITY RESEARCH OPPORTUNITIES FOR THE 1990'S. Committee on Microgravity Research, Space Studies Board. National Research Council, 1995.

Para más información sobre la Estación Espacial Internacional, conéctese al WWW en http://issa-www.jsc.nasa.gov/ss/prgview/prgview.html.

Para más información sobre el presupuesto federal para I+D, acceda al WWW en Gopher: //sunny.stat-usa.gov:70/00/BudgetFY96/Perspectives/bud96p08.txt.

Ciencia y empresa

Materiales

Magnetorresistivos

Los físicos llaman magnetorresistencia al cambio operado en la resistencia eléctrica de un material en presencia de un campo magnético. El fenómeno reviste particular importancia por su aplicación técnica en sensores, actuadores y registradores magnéticos. Desde hace algunos años se sabe, además, que ciertos materiales intermetálicos, estructurados en capas y granulares, así como los semiconductores magnéticos, presentan una importante magnetorresistencia o, como suele decirse, una magnetorresistencia gigante.

El interés renovado por el fenómeno de la magnetorresistencia se inició en 1988 cuando un grupo de la Universidad de París descubrió que las multicapas artificiales de cobalto y cobre presentaban un cambio brusco de su resistencia eléctrica al aplicar un campo magnético de unos pocos centenares de oersted. (Así se denomina, en honor de Hans Christian Oersted, la unidad de intensidad del campo electromagnético.) Fue fácil descubrir que el origen de dicho fenómeno tan insólito se encontraba en la transformación del orden antiferromagnético, o disposición antiparalela de los espines, en orden ferromagnético, o disposición paralela de los espines.

Tras ese hallazgo se desató en laboratorios de todo el mundo una búsqueda frenética de nuevos materiales que permitieran sacarle partido al fenómeno de la magnetorresistencia gigante para aplicarlo a sensores de campo magnético, sensores de posición y sensores de velocidad, o incluso en cabezales para la grabación magnética.

Entre los nuevos materiales que se han descubierto destacan ciertos óxidos de manganeso con estructura cristalográfica de tipo perovskita que presentan los mayores porcentajes de modificación de resistencia eléctrica jamás observados, si dejamos de lado los materiales superconductores. La existencia de un extraordinario cambio de resistividad convierte a estos materiales en potencialmente útiles para un sinfín de aplicaciones. El cambio de resistividad que se observa en un material superconductor se obtiene, hasta ahora por lo menos, a temperaturas relativamente bajas (por debajo de los –130 ºC) mientras que en los óxidos de manganeso el cambio máximo de resistencia se observa a temperaturas cercanas a la ambiente. De ahí el entusiasmo que han desatado en la comunidad científica.

El Instituto de Ciencia de los Materiales de Barcelona (ICMAB) del Consejo Superior de Investigaciones Científicas ha venido investigando durante el último año la optimización del uso de dichos materiales como sensores. Para ello ha examinado los mecanismos estructurales, electrónicos y magnéticos que controlan la magnetorresistencia de estos materiales. Se han obtenido materiales con una magnetorresistencia negativa y colosal: se han observado disminuciones relativas de resistencia de hasta el 10^6 %. (Por disminuciones relativas ha de entenderse la variación de resistencia al aplicar el campo magnético dividido por el valor de la resistencia bajo campo.)

Para comprender el carácter excepcional de las propiedades electrónicas y magnéticas debemos desentrañar la razón por la que estos materiales poseen conductividad metálica y la causa de que aparezca un ordenamiento ferromagnético.

En estos materiales, los iones Mn^{4+} poseen tres electrones en los orbitales 3*d*, denominados t_{2g}, que, debido a su débil recubrimiento con los orbitales 2*p* de los iones oxígeno vecinos, están confinados en el correspondiente ion Mn^{4+} y, por tanto, dan lugar a momentos magnéticos localizados. Ahora bien, si se modifica la composición química del óxido y se genera una valencia mixta Mn^{4+}/Mn^{3+}, los electrones adicionales ocupan otros orbitales 3*d*, denominados e_g, que poseen un fuerte recubrimiento con los orbitales 2*p* de los átomos de oxígeno vecinos. En virtud de ello, estos electrones se comparten y presentan un carácter deslocalizado, no fijo. Esta deslocalización es la característica básica de un metal, pues en él las cargas eléctricas pueden moverse libremente. Así los electrones e_g confieren al óxido de manganeso una conductividad metálica.

Pero, ¿qué les ocurre a esos mismos electrones cuando saltan de un ion de $Mn^{4+/3+}$ a su vecino? De acuerdo con la regla de Hund sobre la estructura electrónica del átomo (así llamada en honor de F. Hund y que afirma que los orbitales de una subcapa de un átomo debe ocuparse por electrones individuales con espines paralelos antes de ocuparse por pares electrónicos con espines antiparalelos), resulta energéticamente favorable que el cuarto electrón tenga su espín con la misma orientación que los tres precedentes: se trata de un orden ferromagnético a escala atómica. Por este mecanismo familiar a físicos y químicos, conseguimos generar un material ferromagnético: a medida que el electrón se desplaza en el cristal va forzando a que los espines localizados se dispongan en paralelo. A la interacción responsable de dicho fenómeno se la denomina doble intercambio. El recíproco también es cierto: la movilidad de estos electrones es máxima si los momentos magnéticos de los iones manganeso son paralelos.

¿Por qué entonces dichos materiales presentan una magnetorresistencia tan colosal? La razón no es inmediata. Hay diversos factores que pueden afectar a la movilidad de los electrones itinerantes. La mejor forma de hacerse una imagen de lo que ocurre es partir de un estado magnético completamente ordenado, es decir, el estado ferromagnético a cero grados kelvin, e introducir progresivamente un mayor grado de desorden.

A 0K el orden ferromagnético es perfecto. Por tanto, los electrones itinerantes (e_g) —en la banda llamada de conducción— estarán todos polarizados paralelamente a los espines localizados. En estas condiciones los electrones de conducción se mueven con facilidad, ya que todos los iones Mn^{4+} que visitan tiene sus espines paralelos. La aplicación de un campo magnético no modifica el orden magnético ni, por consiguiente, se altera la movilidad de los electrones: la magnetorresistencia es nula.

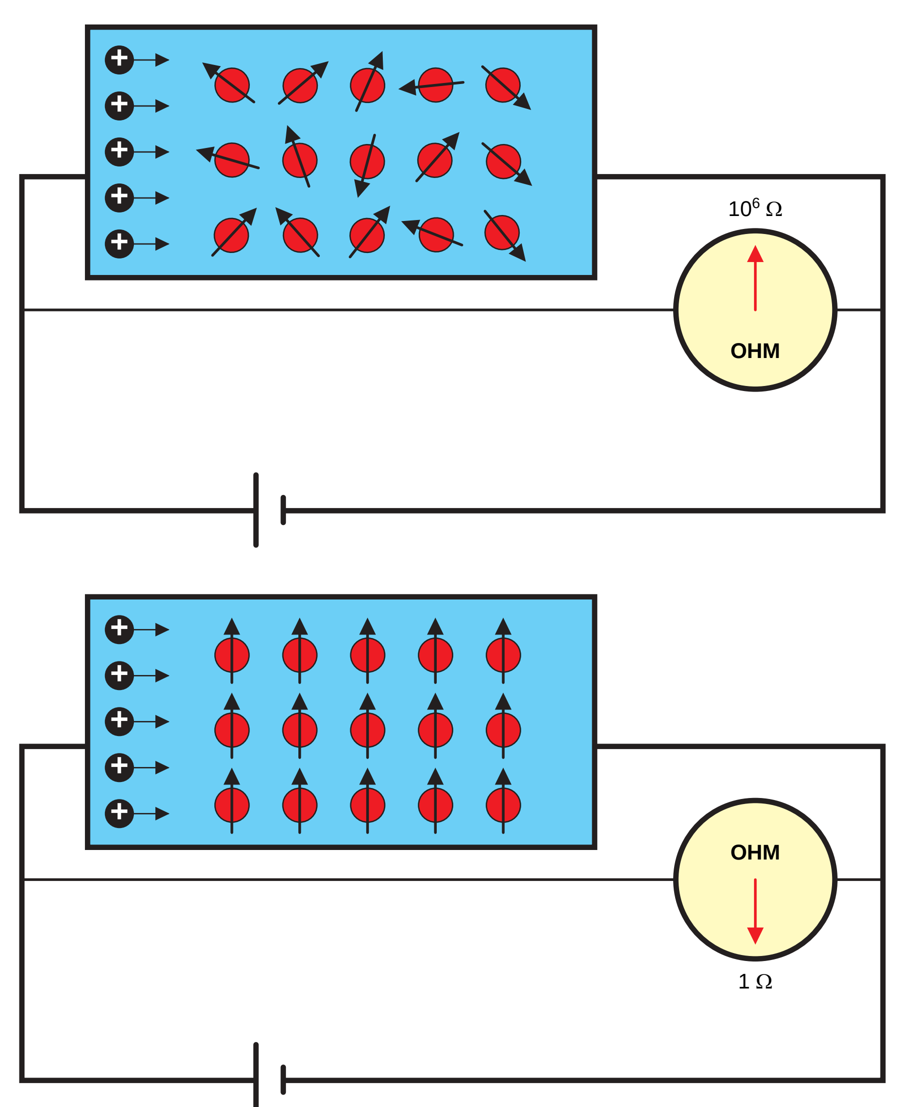
Conforme aumentamos la temperatura, disminuye la magnetización del estado ferromagnético al producirse excitaciones cuánticas colectivas, que denominamos ondas de espín. En ellas, los momentos

magnéticos de los iones vecinos ya no son paralelos, lo que significa que los electrones itinerantes encuentran ahora barreras importantes al saltar de una posición a otra del cristal y, por tanto, la resistencia eléctrica crece. Dichas barreras sólo desaparecen al aplicar un campo magnético, ya que éste alinea los espines e induce, pues, un mayor paralelismo entre los espines. Así, vuelve a aumentar la movilidad de las cargas eléctricas, disminuye la resistividad y aparece el fenómeno de la magnetorresistencia (negativa). Como el desorden magnético sigue aumentando a medida que nos acercamos a la temperatura de Curie (en honor de Marie Curie), donde el orden ferromagnético desaparece, la magnetorresistencia será máxima a dicha temperatura crítica.

¿Qué ocurrirá a más alta temperatura, en la fase paramagnética, cuando los espines están desordenados? Si nos alejamos suficientemente de la temperatura de Curie, tendremos un desorden total de los espines localizados. Puesto que la energía cinética de los electrones itinerantes será mucho mayor que la energía magnética, no se producirán pérdidas significativas de energía al saltar de una posición a la siguiente. De esta forma la resistencia eléctrica no se verá afectada por los espines localizados y será también nula la magnetorresistencia.

En cuando disminuimos la temperatura y nos acercamos a la temperatura de Curie, se desarrollan correlaciones ferromagnéticas entre los espines localizados y los electrones itinerantes. Es decir, aparecen los polarones magnéticos, unas nubes ferromagnéticas que acompañan a los electrones en su movimiento. En consecuencia, se frena la movilidad de los electrones, pues deben arrastrar los polarones consigo. En términos técnicos se dice que su masa efectiva es ahora muy grande y, por tanto, la resistividad aumenta rápidamente al disminuir la temperatura. Al llegar a la temperatura de Curie, donde todos los espines del sistema se ordenan ferromagnéticamente, el tamaño de la nube que acompaña al electrón crece hasta las dimensiones del cristal, con lo que el electrón vuelve a ser libre y la resistencia disminuye de forma drástica.

Precisamente lo que nuestro grupo del Instituto de Ciencia de los Materiales ha demostrado es que esta movilidad puede reducirse muchísimo cuando se distorsiona la estructura cristalográfica, ya que disminuye el recubrimiento de los orbitales y la banda de conducción disminuye su anchura. La consecuencia final de estas investigaciones es que ahora sabemos cómo podemos modular a voluntad la movilidad de los portadores, es decir, la resistencia eléctrica y, por ende, la magnetorresistencia.



El paso de corriente eléctrica a través de un material magnetorresistivo está fuertemente condicionado por la orientación de los espines atómicos. En la figura superior la orientación al azar de los espines (temperatura por encima de la temperatura de Curie) da lugar a una gran resistividad eléctrica, mientras que cuando dichos espines se ordenan (abajo), *ya sea por debajo de la temperatura crítica o mediante un campo magnético externo, la resistividad decrece extraordinariamente. En el ejemplo, la resistividad es un millón de veces inferior*

Este descubrimiento abre nuevas vías para el diseño de dispositivos electrónicos que aprovechen la enorme sensibilidad de dichos materiales a cualquier cambio del campo magnético ambiental. En particular, estamos desarrollando un sensor magnetorresistivo capaz de detectar la presencia de elementos metálicos en su entorno. De ese modo, la realización de tacómetros, controladores de velocidad, detectores de posición, lectores de tarjetas magnéticas y otros parece hoy al alcance de la mano usando los nuevos materiales y con una sensibilidad extraordinariamente superior a los existentes. En un futuro más lejano, su incorporación como cabezales de lectura de memorias magnéticas podría permitir avanzar en el camino de los 1,6 gigabytes por centímetro cuadrado, que constituye el reto técnico del próximo decenio.

XAVIER OBRADORS
Y JOSEP FONTCUBERTA
Instituto de Ciencia de los
Materiales de Barcelona CSIC

Europa espacial

Horizonte 2000+

La reciente aprobación del programa Horizonte 2000+ por la Agencia Espacial Europea (ESA) supone la actualización del programa Horizonte 2000 que se puso en marcha en 1984 y cuyo término se fijó en el año 2006. El Horizonte 2000+ contiene la programación de las misiones científicas de la ESA que deberán desarrollarse desde 1995 hasta el año 2016. Esta revisión no sólo ha supuesto la introducción de nuevas misiones, sino también el examen crítico de los elementos del programa en sus aspectos metodológicos y científicos.

Antes de la definición del Horizonte 2000, la Agencia Espacial Europea no disponía de una programación de las misiones científicas a largo plazo, situación que provocaba graves disfunciones en la selección de los programas. Una decisión sobre una misión no puede ignorar a las otras en curso o futuras. Su tiempo de desarrollo, cifrado en torno a los diez años, y la maduración de las nuevas técnicas que suelen requerir hacen necesario planificar la carga de trabajo a repartir entre los centros de desarrollo.

Para resolver el problema, la ESA creó en 1984 el programa H2000. En él se conjugaban las demandas de la comunidad científica con una cierta dosis de realismo, tanto desde el punto de vista técnico como económico. Se definieron dos clases de misiones: las básicas ("cornerstones") y las de tamaño medio (M).

Las básicas eran cuatro: Soho-Cluster, XMM, FIRST y ROSETTA. El primero es una misión solar; los dos siguientes, de astronomía de rayos X y radio, y el último pretende tomar muestras de un cometa siguiendo una tradición comenzada con la misión *Giotto* al cometa Halley.

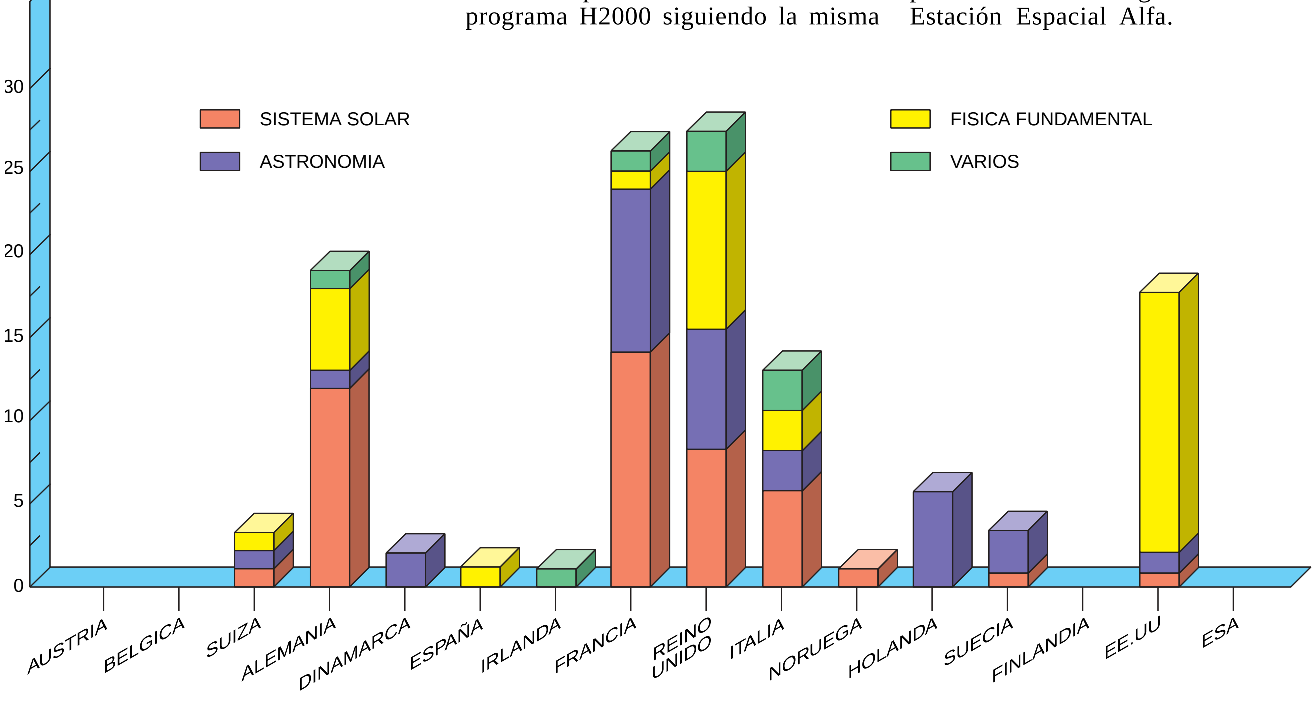
Las cuatro misiones de tamaño medio no estaban definidas de antemano. Se van determinando tras consulta previa a la comunidad científica y se seleccionan en un proceso de tres años de duración. Hay ya dos misiones M seleccionadas: la sonda Cassini-Huygens a Titán y el satélite de astronomía Gamma INTEGRAL. Hace escasamente un mes se ha seleccionado Cobras-Samba como la tercera (M3): un satélite diseñado para intentar resolver las anisotropías de la radiación de fondo del universo.

En diciembre de 1993 comenzó el proceso de revisión del H2000 con la creación de varios comités en las áreas de astronomía, sistema planetario, física solar y física fundamental. Al cabo de un año de debates se presentaron las conclusiones al ejecutivo de la ESA para su aprobación. La primera conclusión, la más importante también, fue recomendar la continuación de la planificación iniciada en el programa H2000 siguiendo la misma metodología de definir misiones básicas y de tamaño medio.

La segunda establece tres nuevas misiones básicas. Una misión a Mercurio, un satélite dedicado a la detección de ondas gravitacionales y otro a la interferometría astronómica. Se conjugan de esta forma tres prioridades científicas: explorar uno de los planetas más desconocidos del sistema solar, verificar una de las predicciones teóricas más interesantes de la teoría general de la relatividad y resolver los objetos celestes con precisiones del milisegundo de arco o menores, siendo éste uno de los grandes retos de la astronomía moderna.

A esas tres misiones centrales se les unen cuatro de tamaño medio dirigidas a la astronomía de rayos X, ultravioleta e infrarrojos, y una cuarta a física fundamental. Estas misiones continúan de forma natural y con técnicas mucho mas avanzadas las actualmente en curso del H2000.

Se definen dos grandes misiones más, tipo observatorio, para el final del programa en el campo de la astronomía de rayos X y en el infrarojo. Complementariamente a todos estos grandes satélites se prevé un conjunto de pequeñas misiones en los campos de la observación solar y la exploración planetaria, sujetas a los intereses nacionales de los estados miembros en cooperación con la ESA. Aunque no ha sido un elemento de discusión en el marco del H2000+, también se contemplan las participaciones en las cargas útiles de la Estación Espacial Alfa.



Número de respuestas por país para la definición de las misiones del H2000+. Sólo se considera el primer firmante (investigador principal)

Con el H2000+ ya definido tanto en contenidos como en métodos de trabajo, Europa dispone del marco de referencia para los próximos veinte años en el que desarrollar su tecnología puntera y avanzar en nuestro conocimiento del cosmos.

VÍCTOR REGLERO
Depto. de Astronomía y Astrofísica
Universidad de Valencia

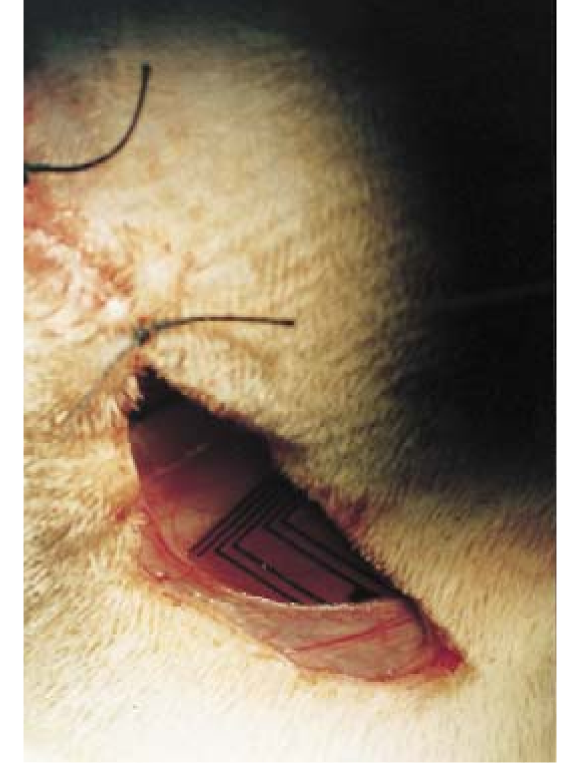
Biónica

Prótesis neurales

En cada instante el sistema nervioso utiliza una ingente cantidad de información del medio externo e interno para organizar la conducta. El cerebro sólo se comunica con el medio externo utilizando estructuras intermedias: los órganos de los sentidos, para la entrada de información, y los músculos, para su salida. La entrada de información en el sistema nervioso se produce mediante órganos sensoriales específicos que traducen distintas modalidades de energía del entorno en cambios energéticos que, como los potenciales bioeléctricos de membrana, son el sustrato material para la transferencia y el procesamiento de información en el tejido neural. La actuación del sistema nervioso sobre su entorno está necesariamente mediada por la actividad bioeléctrica de las neuronas motoras y el correspondiente acortamiento de las fibras musculares químicamente acopladas con ésta.

Las prótesis son dispositivos electromecánicos con los que se pretende compensar las minusvalías sensitivas o motoras producidas por las lesiones de los órganos de los sentidos o de las eferencias neuromusculares. Las prótesis tradicionales no interactúan directamente con el tejido nervioso, siendo activadas desde órganos periféricos que aún conservan el control nervioso. Por tanto, esta modalidad de prótesis interactúa con aferencias o eferencias nerviosas distintas de las que realizaban de forma fisiológica la función ahora protetizada. La utilización de vías anómalas de comunicación limita severamente la capacidad funcional de estas prótesis. Este es el caso de los dispositivos para introducir información visual a invidentes mediante el tacto. Tales dispositivos permiten moverse con relativa soltura por una habitación, pero no facultan para tareas más complejas, como la de conducir un vehículo. Otro ejemplo es el de las prótesis mioeléctricas de miembros amputados, prótesis que, controladas por el paciente mediante la activación de músculos sanos, permiten sujetar un vaso pero no realizar tareas complejas, como escribir a máquina.

Las prótesis que permiten una conexión funcional directa con el tejido nervioso se denominan prótesis neurales, de las que existen dos grandes modalidades: las que se proponen introducir información desde el medio hacia el tejido nervioso y las diseñadas para obtenerla del sistema nervioso y utilizarla en el control del medio externo.



Sutura de la piel de un animal de experimentación en el que ha quedado implantado un microcircuito de substrato blando

La primera modalidad de prótesis neural suele apoyarse en la estimulación eléctrica. Aunque actualmente se realizan costosas investigaciones para desarrollar dispositivos que permitan trasmitir imágenes a invidentes mediante una matriz de electrodos situados en la retina o en la corteza visual, los únicos dispositivos clínicamente útiles para trasmitir información al cerebro de sujetos con discapacidades sensoriales son las prótesis cocleares. Mediante una secuencia de 20-30 electrodos instalados en el oído interno se estimula el nervio auditivo de pacientes con sordera por lesión del oído medio o externo, alcanzándose así ciertos niveles de audición que, aunque muy restringidos, les resultan valiosos.

El beneficio potencial de las prótesis aferentes está limitado por el tamaño de los electrodos de estimulación y por la distancia interpuesta entre éstos y las neuronas a activar. La resolución espacial está limitada por el uso de macroelectrodos que, en un radio de varios milímetros, estimularán de forma inespecífica la actividad de multitud de neuronas. Las distancias electrodo-neurona obligan a incrementar las corrientes de estimulación, con lo que el tejido tardará muchos milisegundos en recuperarse de la estimulación previa y sólo se conseguirán bajas frecuencias de estimulación efectiva.

Se acude también a la macroestimulación para el tratamiento de enfermedades en las que, como ocurre con los pacientes parkinsonianos o con dolor crónico, ha de modificarse globalmente la actividad de una zona cerebral sin que resulte necesario un control preciso y rápido de las neuronas que la integran.

La segunda modalidad de prótesis neural utiliza la actividad bioeléctrica de un grupo de neuronas para el control de la propia prótesis, de manera que el paciente pueda, sin necesidad de hacer movimiento alguno, actuar sobre dispositivos externos: miembros artificiales, ordenadores y otros. Se trata, por tanto, de introducir un elevado número de microelectrodos en zonas muy próximas a las neuronas de un grupo celular, y emplear, como medio de actuación sobre las prótesis, alguna variable que, como la frecuencia de potenciales de acción de las motoneuronas alfa, pueden ser reguladas voluntariamente.

No se dispone todavía de ninguna prótesis de esta segunda modalidad que se aplique en clínica. Los requerimientos fundamentales para el desarrollo de las prótesis neurales eferentes son cinco. En primer lugar, los microsensores deberán ser susceptibles de implante no traumático, permaneciendo activos durante largos períodos de tiempo a pesar de estar expuestos a la acción del medio extracelular y de las poblaciones celulares que se encargan de aislar y degradar los materiales extraños al organismo.

En segundo lugar, los microsensores han de tener unas dimensiones pró-

ximas al radio medio de las neuronas, esto es, entre 5 y 60 micrometros, y hallarse empaquetados en espacios muy restringidos, de suerte que pueda implantarse un número elevado de ellos sin alterar el tejido receptor.

En tercer lugar, la actividad bioeléctrica de cada una de las neuronas conectadas a la prótesis deberá digitalizarse; ello significa que, considerando que el potencial de acción neuronal dura de 0,5 a 5 milisegundos, cada canal deberá muestrearse al menos 20.000 veces por segundo, lo que para un conversor analógico digital de 16 bits y cien señales paralelas suponen 244 megabytes por minuto. Inmediatamente tras la digitalización se ha de proceder a la identificación y clasificación de los potenciales de acción.

En cuarto lugar, la clasificación de potenciales de acción se utilizará para estimar en tiempo real las distintas variables que, como la frecuencia de descarga de cada neurona o la correlación cruzada de la actividad de distintas neuronas, se utilizarán para el control rápido y eficiente del dispositivo protésico. Un último requerimiento es que todo el dispositivo pueda miniaturizarse en unas dimensiones físicas aceptables en la vida del paciente.

Hemos terminado ya la primera fase del desarrollo de un prototipo de prótesis neural de miembro superior con la cual pretendemos reunir, una vez finalizado completamente el proyecto, las características referidas. En este proyecto interviene un grupo multidisciplinar. Carlos González, del departamento de bioingeniería de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicaciones de Madrid, se encarga de los electrodos. Sergio González, hoy en ImásD S.A. de Las Palmas, se ha ocupado de los amplificadores y filtros. Juan Santos, del departamento de señales y sistemas de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicaciones de Madrid, se ha responsabilizado de la digitalización y preprocesado de señales. Patricio Gracia y Carmen Suárez, de las universidades de La Laguna y Las Palmas de Gran Canaria, han trabajado en la clasificación de potenciales de acción mediante redes neuronales artificiales. Lucio Díaz-Flórez, de la Universidad de La Laguna, es el responsable de los estudios histológicos de los nervios implantados. Aurelio Vega, del Centro de Microelectrónica Aplicada de Las Palmas, trabaja en un sistema de promediado para incrementar la relación señal-ruido de los registros nerviosos. Magdalena Sabaté, del Hospital Universitario de Canarias, y Cristo Santana, de la Universidad de La Laguna, investigan la futura aplicación en pacientes amputados.

MANUEL RODRÍGUEZ DÍAZ
Coordinador del proyecto
"Prótesis Neurales"
Universidad de La Laguna, Tenerife

Luz de sincrotrón

Primer acelerador español

La investigación en España ha crecido de forma importante en los últimos 15 años. Sin embargo, por lo que a infraestructuras se refiere, carecemos todavía de instalaciones a gran escala. En particular, no existe ninguna dedicada a la obtención de luz de sincrotrón (LS).

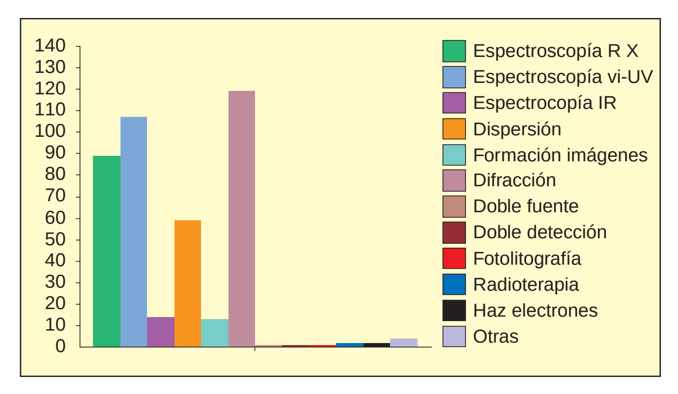
Llamamos luz de sincrotrón a la que emiten las partículas dotadas de carga que se mueven a velocidades relativistas cuando se las somete a trayectorias curvadas. Se recurre a esta luz focalizada y linealmente polarizada, de alta energía e intensidad, para estudiar la estructura de la materia. Se emplea también en aplicaciones industriales o de investigación de carácter físico, químico, biológico, farmacéutico o médico.

El acceso a la LS se ha convertido en una necesidad apremiante para España. Somos el estado de la Unión Europea con mayor número de usuarios de LS en instalaciones extranjeras. Por dar unas cifras indicativas: en 1980 sólo dos de nuestros postdoctorados trabajaban con ella; en 1995, unos trescientos, y hoy se calcula que la demanda potencial a corto plazo abarca más de 80 grupos y cerca de 600 científicos. Ante semejante situación, diversos grupos de diferentes universidades españolas se plantearon en 1992 la necesidad de reclamar la construcción de una fuente de LS en nuestro país.

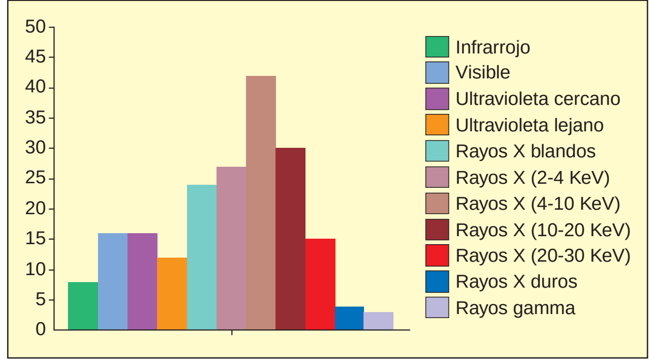
El proyecto del Laboratorio del Sincrotrón de Barcelona (LSB) adquirió rango oficial en 1993. Se incluyó en el Plan de Investigación de Cataluña diseñado por la administración autónoma. En marzo de 1995 se firmó un convenio entre la Comisión Interdepartamental de Investigación e Innovación Tecnológica de la Generalidad y la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología para la financiación conjunta del diseño y su explotación en caso de construcción. En la fase de diseño del LSB trabaja ahora un equipo de 12 personas, entre ellas el autor de esta nota.

La instalación básica para producir luz de sincrotrón es un acelerador circular de partículas (electrones en el LSB).

Los electrones circulan en una circunferencia de unos 250 metros de perímetro, a una energía de 2,5 gigaelectronvolts. El haz de electrones



1. Grupos de técnicas requeridas por los futuros usuarios. El eje vertical representa el número de solicitudes para cada grupo de técnicas



2. Distribución de las respuestas en función de los rangos energéticos solicitados. El eje vertical representa el número de grupos interesados en cada rango energético

tiene una intensidad media de 200 miliampères. Los imanes que guían los electrones (dipolos para conseguir la trayectoria circular, y cuadrupolos y sextupolos para colimar y estabilizar el haz) son convencionales, al alcance de la técnica disponible en empresas españolas. Estos imanes se suceden periódicamente a lo largo del anillo hasta constituir 12 celdas idénticas. Entre celda y celda hallamos una sección recta (12 en total) de siete metros. En 11 de ellas se intercalan los dispositivos de inserción, que producen LS con características específicas para ciertos experimentos. Por lo que concierne a la luz emitida por el haz de electrones, se produce un flujo medio, sobre las muestras, de entre 10^9 y 10^{12} fotones por segundo, lo que significa cien mil veces más que lo alcanzado con cualquier fuente tradicional.

Para asegurarnos de que las especificaciones del LSB se adaptaban a los objetivos que se le habían señalado, se realizó una amplia encuesta a lo largo del año pasado con la que se pretendía determinar las necesidades de sus potenciales usuarios. Junto a esta aproximación, los días 18 y 19 de diciembre de 1995 tuvo lugar la I Reunión de Usuarios de luz de sincrotrón en la Universidad Autónoma de Barcelona, con el fin de conocer y analizar las características de la luz requerida para sus experimentos.

Se enviaron 506 cuestionarios a departamentos universitarios, institutos de investigación y a algunas empresas presumiblemente interesadas. Se recibieron 87 respuestas, que corresponden a 82 grupos y más de 600 investigadores (*véase tabla*); se trata de equipos e individuos de reconocida solvencia. En efecto, los 82 grupos (75 % universitarios, 22 % del CSIC, e industriales o extranjeros el resto) han desarrollado una media de 1,7 proyectos por grupo y año. Sus fuentes de financiación son mayoritariamente públicas (el 88 % de los proyectos), estatales (51 %), autonómicas (16 %) o europeas (21 %), mientras que el resto proviene de empresas o fundaciones. Sus áreas de investigación son: ciencia de materiales (35 % de los grupos), ciencias moleculares (23 %), ciencias de superficies e interficies (18 %), biología estructural (10 %), química analítica (5 %), estudio y mejora de procesos industriales (4 %), física atómica y nuclear (3 %) e instrumentación (1 %).

En la encuesta se pedían los requisitos técnicos deseados para el LSB, al objeto de que el grupo de diseño ajustara en correspondencia las características del sincrotrón. Preguntábamos, en primer lugar, qué técnicas de análisis desearían ver instaladas en el LSB. Las más solicitadas resultaron ser la difracción y las espectroscopías de rayos X (con un 28 % y 25 % respectivamente). Tras ellas, las espectroscopías en el rango visible: rayos X blandos (21 %), técnicas de dispersión (14 %), espectroscopía infrarroja (4 %), formación de imágenes (3 %), radioterapia (0,5 %) y uso directo del haz de electrones (0,5 %).

Desde el punto de vista presupuestario, el condicionante principal para una fuente de luz de sincrotrón es la energía crítica (E_c) de la luz emitida. Dicha energía equivale a $0{,}665BE^2$, donde B designa el campo magnético de los imanes dipolares (en teslas) y E es la energía de los electrones (en gigaelectronvolts). La energía crítica resultante es la mediana de la potencia luminosa emitida; en efecto, para energías inferiores a E_c la luz tiene un espectro amplio y suave, y decae exponencialmente para energías superiores. El rango óptimo de uso llega hasta un valor de $2{,}5E_c$. De ello se infiere que la energía crítica determina la máxima energía aprovechable en la práctica, clave para saber si es posible llevar a cabo las técnicas mencionadas. Para el LSB, se prevé una energía crítica de 4,3 kiloelectronvolts.

El principal grupo de usuarios potenciales (21 %) solicita energías entre 4 y 10 keV. El 70 % de las solicitudes están en el rango entre 0,1 y 30 keV. Una banda pequeña de solicitudes (16 %) está centrada en el rango visible-ultravioleta (1-10 eV). Sólo el 3,5 % de las respuestas solicitaban energías superiores a 30 keV.

No fueron muchos los grupos (el 15 %) que contestaron manifestando su interés por aprovechar la estructura pulsada de la luz de sincrotrón. Por lo que respecta a las condiciones experimentales, el 86 % de las respuestas indica que habría que trabajar con muestras superiores a los cien milímetros cuadrados, en tanto que el resto espera utilizar muestras menores. Un 28 % propone experimentos que requieren bajas temperaturas; por contra, un 20 % necesita instrumentación para alta temperatura. Algunos grupos (13 %) declaran necesitar medios de vacío alto o ultra-alto para las muestras.

La encuesta sólo es una primera aproximación que sirve de orientación en la adaptación del diseño. Sin embargo, las principales características de la máquina ya han quedado perfiladas: debe proporcionar luz con una energía crítica de 4 a 10 kiloelectronvolts y ha de empezar por tener a punto las técnicas de difracción de rayos X y las espectroscopías de rayos X. Asimismo, la energía de los electrones del sincrotrón deberá ser del orden de los 2,5-gigaelectronvolts, lo que ya se contempla en el diseño actual.

En la I Reunión de Usuarios se aceptaron las principales líneas de luz presentadas. Fueron éstas la espectroscopía ultravioleta-ultravioleta lejano, espectroscopía de rayos X blandos, espectroscopía de superficies EXAFS-NEXAFS, espectroscopía de materiales EXAFS-NEXAFS, difracción de muestras no cristalinas, difracción de grandes cristales (macromoléculas y polímeros) y difracción de polvo, magnética y de superficie.

En cualquier caso, el diseño todavía no está cerrado. Y los responsables del LSB se muestran receptivos a cualquier sugerencia.

JOSEP CAMPMANY
Laboratorio del Sincrotrón Barcelona

Distribución de las encuestas y localización de las respuestas

Comunidades Autónomas	**Proporción relativa de encuestas enviadas**	**Proporción relativa de encuestas contestadas***
Cataluña	20%	35%
Madrid	23%	19%
Comunidad Valenciana	8%	14%
Andalucía	18%	9%
Aragçon	4%	6%
Castilla y León	5%	4%
Asturias	2%	2%
Cantabria	2%	2%
Galicia	3%	2%
Murcia	3%	1%
País Vasco	4%	1%
Otras	7%	-
Investigadores españoles en el extranjero (Europa y USA)	1%	5%

** Porcentajes referidos al total de encuestas contestadas*

Taller y laboratorio

Shawn Carlson

Una electrobalanza micrográmica de factura casera

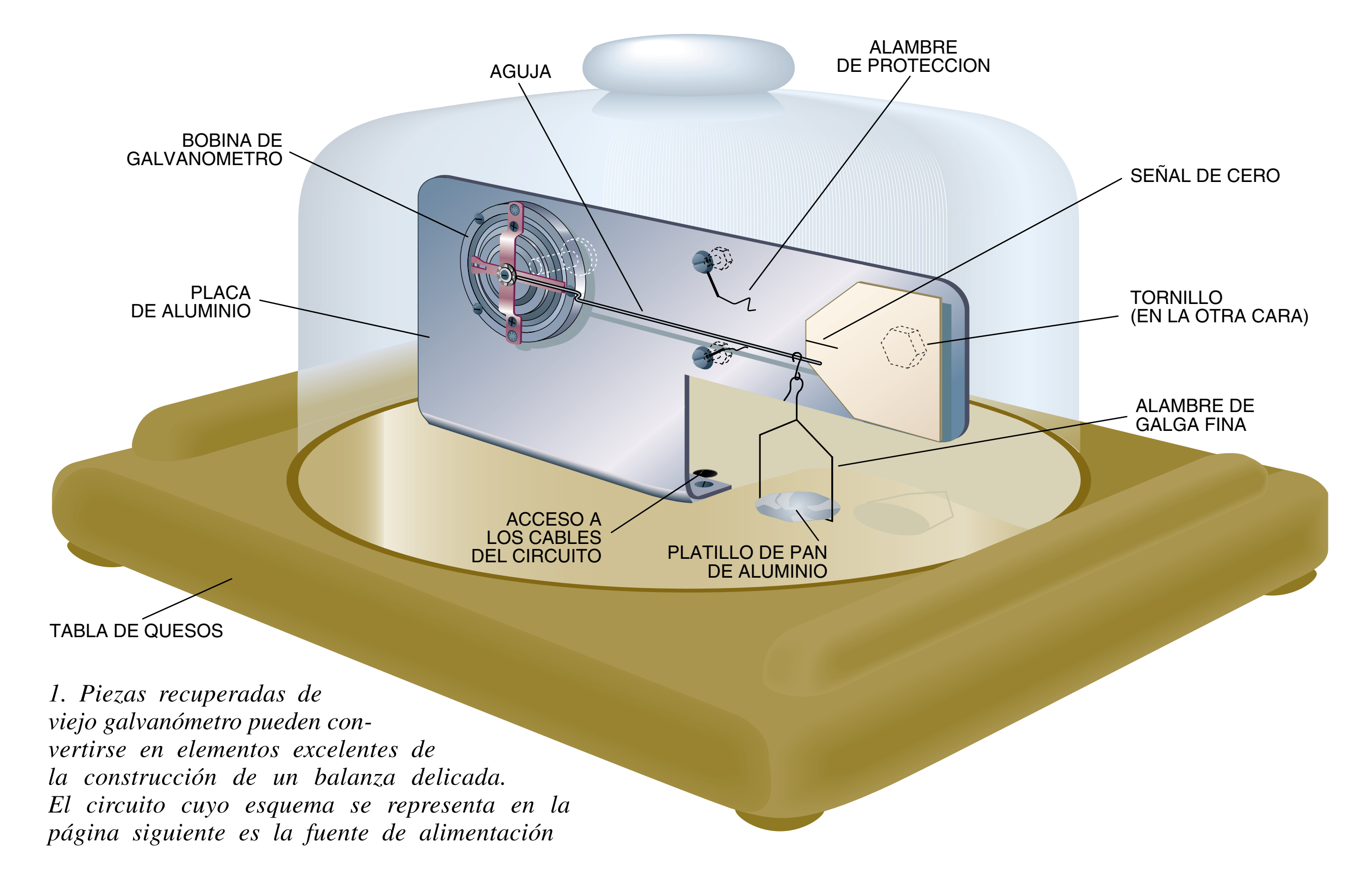
Las balanzas micrográmicas son instrumentos muy ingeniosos capaces de medir masas fantásticamente minúsculas. Los modelos de la gama alta hacen uso de una genial combinación de aislamiento mecánico, aislamiento térmico y magia electrónica para producir mediciones repetibles hasta de una décima de millonésima de gramo. Con sus primorosas cajas de vidrio y sus monturas doradas, estos aparatos se asemejan más a obras de arte que a instrumentos científicos. Los últimos modelos pueden costar millón y medio de pesetas y suelen requerir del tacto de un experto para sonsacar una información fiable separándola del ruido de fondo.

No obstante su precio y su aparente complejidad, estos dispositivos son muy sencillos en esencia. Un tipo muy corriente se basa en una bobina magnética que genera un par de fuerzas que suavemente equilibra una muestra situada en el extremo de un brazo de palanca. Al aumentar la corriente eléctrica que pasa por la bobina, aumenta el par de fuerzas. Por tanto, la corriente necesaria para contrarrestar el peso de la muestra nos ofrece una medida directa de la masas de la misma. Las bobinas de las balanzas comerciales están montadas sobre pivotes de zafiro azul pulido. Se emplean zafiros porque su extrema dureza (sólo superada por la del diamante) impide el desgaste de los pivotes. La corriente que atraviesa la bobina está controlada por unos dispositivos sensores y unos circuitos muy perfeccionados, razón por la cual las electrobalanzas micrográmicas resultan tan caras.

Y eso es una estupenda noticia para nuestros aficionados. Si el lector está dispuesto a que su vista sustituya a los sensores y que sus manos sustituyan a los circuitos, podrá construirse una delicada electrobalanza por unas 4000 pesetas.

George Schmermund, que vive en la californiana ciudad de Vista, me lo explicó con toda claridad. Lleva él más de 20 años al frente de una pequeña empresa de nombre Science Resources, que compra, repara y personaliza equipos científicos. Aunque para sus clientes pueda ser un profesional riguroso, me consta que es una persona de espíritu más que libre que invierte tiempo en los negocios sólo para ganar el dinero suficiente que le permita dar riendas a su auténtica pasión: la ciencia al alcance del aficionado.

Schmermund posee cuatro caras electrobalanzas micrográmicas de las que se venden en tiendas especializadas. Pero en interés del progreso del amateurismo, decidió comprobar qué tal le iría haciendo economías. Tramó así una cándida diversión consistente



1. Piezas recuperadas de viejo galvanómetro pueden convertirse en elementos excelentes de la construcción de un balanza delicada. El circuito cuyo esquema se representa en la página siguiente es la fuente de alimentación

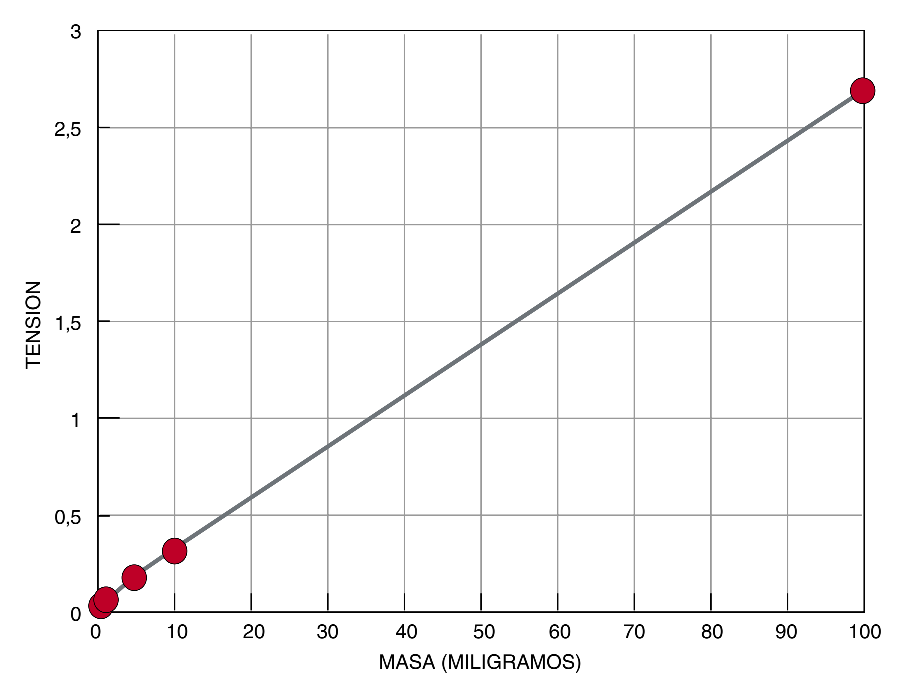
en combinar una tabla de cortar quesos y un viejo galvanómetro, instrumento éste que mide intensidades de corriente eléctrica. El resultado fue una electrobalanza capaz de determinar pesos comprendidos entre 10 microgramos y 500.000 microgramos (0,5 gramos).

La precisión de las mediciones es impresionante. Me ocupé de comprobar que su diseño tiene un poder separador que rebasa un miligramo con una incertidumbre menor que el uno por ciento. Además, en el intervalo de los 100 microgramos puede distinguir masas que difieran en sólo dos microgramos. Y el cálculo sugiere que el instrumento puede medir masas aisladas insignificantes: de 10 microgramos. (Yo no dispuse de un peso tan pequeño para hacer la comprobación.)

Resulta fácil obtener el componente crítico, el galvanómetro. Estos aparatos son la piedra angular de los antiguos medidores eléctricos analógicos, es decir, de los que emplean una aguja montada en una bobina. Al atravesar la bobina, la corriente crea un campo magnético que mueve la aguja. El diseño de Schmermund necesita la aguja, montada en el plano vertical, para que actúe de brazo de palanca, colgando las muestras de su extremo.

Probablemente los almacenes de excedentes eléctricos dispongan de varios galvanómetros analógicos. Un buen método para juzgar su calidad es sacudirlos suavemente de costado a costado. Si la aguja no se mueve, estamos ante una bobina adecuada. Más allá de esta comprobación, un extraño sentido de la estética me guía al elegir un aparato de medida. No sabría definir tal sentimiento, pero si me digo en mi interior "¡Este sí es un bonito aparato!" cuando lo examino, lo compro. Semejante tirón estético rinde beneficios en la práctica. Los aparatos de medida finamente manufacturados y diseñados acostumbran encerrar unas bobinas excelentes, de la misma calidad que las bobinas de las electrobalanzas de la mejor clase, incluidos unos cojinetes de zafiro y lo demás.

Para construir la balanza, libere suavemente la bobina de su alojamiento en el aparato, procurando no dañar la aguja. Monte la bobina en un trozo de placa de aluminio (*véase la figura 1*). Si le es imposible emplear placa de aluminio, monte la bobina dentro de una caja de plástico. Para aislar la balanza de las corrientes de aire, fije todo el conjunto en una tabla de quesos con tapa de vidrio, con la placa de aluminio derecha de modo que la aguja se mueva arriba y abajo. Los dos pesados alambres de protección, canibalizados del galvanómetro, se montan en el soporte de aluminio para limitar la amplitud del desplazamiento de la aguja.



2. El calibrado de la balanza se realiza representando gráficamente la tensión eléctrica necesaria para elevar masas conocidas en función del valor de éstas

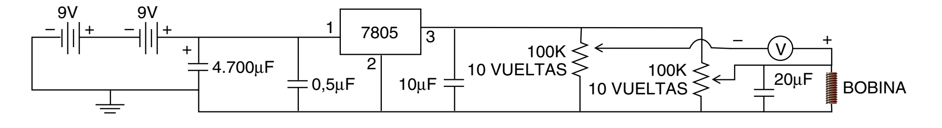
Con epoxia pegue un pequeño tornillo al soporte de aluminio, exactamente detrás de la punta de la aguja. Esta debe pasar por delante del tornillo sin tocarlo. Cubra el tornillo con un trocito de papel de color y luego trace una fina raya horizontal que atraviese el papel por el centro. Esa raya define la posición cero de la escala.

La bandeja de las muestras que cuelga de la aguja no es más que un pequeño marco hecho en casa doblando alambre sin aislar. No es crítico el diámetro exacto de este alambre, pero debe ser fino: la galga del 28 nos irá bien. En la base del marco de alambre descansa un pequeño círculo de pan de aluminio que sirve de platillo. Para evitar la contaminación con grasa corporal, no toque nunca la bandeja (ni las muestras) con los dedos; mejor utilice pinzas.

Para alimentar la bobina, necesitaremos un circuito que dé una tensión estable de cinco volts. No sustituya la batería por un adaptador CA-CC, salvo que esté dispuesto a añadir unos filtros que supriman las fluctuaciones de tensión de baja frecuencia.

El dispositivo hace uso de dos resistencias variables de precisión (también llamadas potenciómetros y reóstatos) de 100 kilohms y 10 vueltas, la primera de ellas para ajustar la tensión entre los extremos de la bobina y la segunda para proporcionar una referencia de cero. Un condensador de 20 microfarads tampona la bobina ante las posibles irregularidades bruscas en la respuesta de las resistencias y facilita los ajustes delicados de la posición de la aguja. Para medir la tensión en la bobina le hará falta un voltímetro digital capaz de leer 0,1 milivolt. Radio Shack ofrece versiones manuales bastante económicas. Con una fuente de alimentación de cinco volts, la balanza de Schmermund puede levantar 150 miligramos. Para pesos mayores, sustituya el microcircuito regulador de tensión 7805 por un microcircuito 7812. Este genera una tensión estable de 12 volts y levantará objetos que pesen hasta casi medio gramo.

Para calibrar la balanza precisaremos un juego de pesos micrográmicos conocidos. El precio normal de un solo peso calibrado de alta precisión de entre uno y



100 microgramos ronda las 8000 pesetas y necesitaremos al menos dos. Hay, sin embargo, una solución más barata. La norteamericana Society for Amateur Scientists está ofreciendo, por diez dólares, juegos de dos pesos micrográmicos calibrados adecuados a nuestro proyecto. Adviértase que esos dos pesos le permiten calibrar la balanza con cuatro masas de pesos conocidos: cero, el peso uno, el peso dos y la suma de ambos pesos.

Para efectuar una medición, empiece con el platillo vacío. Cubra el aparato con su tapa de vidrio. Reduzca al máximo la corriente ajustando la primera resistencia a su máximo valor. Seguidamente, ajuste la segunda resistencia hasta que se lea una tensión lo más cercana a cero posible. Anote ese valor de la tensión y no toque la resistencia de puesta a cero hasta haber acabado todas las mediciones. Entonces accione la primera resistencia hasta que la aguja baje hasta el tope inferior, luego acciónela en sentido contrario hasta que la aguja retorne a la señal de cero. Observe otra vez el valor de la tensión. Para definir el punto de cero de la balanza emplee el valor medio de tres mediciones de la tensión.

A continuación, aumente la resistencia hasta que la aguja descanse sobre el soporte de alambre inferior. Coloque un peso en la bandeja y reduzca la resistencia hasta que una vez más la armadura tape la raya. Anote la tensión. De nuevo, repita tres veces la medición y saque la media. La diferencia entre esas dos tensiones medias es una medida directa del peso de la muestra.

Una vez que haya medido los pesos calibrados, represente gráficamente las tensiones en función de las masas levantadas. Los puntos correspondientes deben estar en una recta. Podemos así ya leer la masa que corresponde a cualquier tensión que hayamos leído.

Por encima de 10 miligramos, la balanza de Schmermund es lineal en grado sumo. La pendiente de la línea de calibrado decrecía sólo en 4 por ciento a los 500 microgramos, el peso calibrado más pequeño de que dispusimos. Sin embargo, les sugiero firmemente que calibren su balanza cada vez que la empleen y siempre comparen las muestras directamente con sus pesos calibrados.

Para pedir los dos pesos calibrados, escriba a Society for Amateur Scientists, 4951 D Clairemont Square, Suite 179, San Diego CA 92117.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

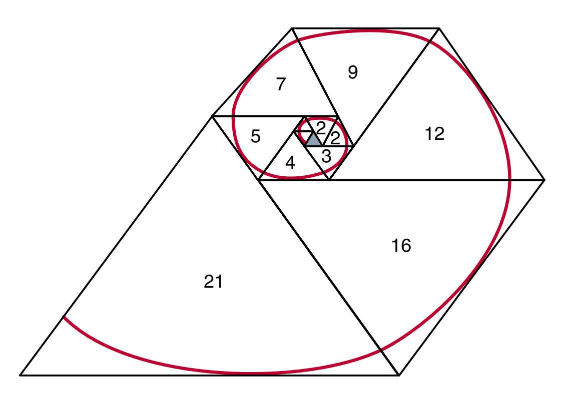
Cuentos de un número desdeñado

Describí el mes pasado las esculturas matemáticas de Alan St. George, quien suele valerse del conocido "número áureo". El catálogo de su exposición lisboeta menciona asimismo un pariente menos glamoroso, aludiendo a una serie de artículos en los que el "arquitecto Richard Padovan revelaba las glorias del 'número plástico'". El número plástico apenas tiene historia, hecho curioso, habida cuenta de las grandes virtudes que posee como instrumento de diseño, pero sus orígenes en matemáticas son casi tan respetables como los de su primo áureo. Es cierto que no parece presentarse en la naturaleza con tanta frecuencia como éste, pero también lo es que nadie se ha esforzado en encontrarlo.

Permítaseme, con fines comparativos, recordar el número áureo: $\varphi = 1 + \quad + 1/\varphi = 1{,}618034$, aproximadamente. El número áureo guarda íntima conexión con los números de Fibonacci, famosa sucesión que cabe ilustrar mediante un sistema de cuadrados que crece en espiral (*véase la figura 1 arriba*). El cuadrado inicial (en gris) tiene lado 1, al igual que su vecino de la izquierda. Sobre estos dos primeros cuadrados se superpone un cuadrado de lado 2, seguido a su vez por cuadrados de lados 3, 5, 8, 13, 21, y así sucesivamente. Estos números, cada uno de los cuales es la suma de los dos que le preceden, forman la sucesión de Fibonacci. La razón de los pares consecutivos de números de Fibonacci tiende hacia el número áureo. Por ejemplo, $^{21}/_{13} = 1{,}615384$.

Esta propiedad es consecuencia de la regla de formación de los números de Fibonacci: para números grandes conduce a la ecuación $\varphi = 1 + 1/\varphi$. Si en el interior de cada cuadrado se traza un cuadrante de circunferencia, estos arcos quedan conectados y forman una elegante espiral. Dicha espiral constituye una buena aproximación de la llamada espiral logarítmica, que es frecuente encontrar en la naturaleza; pensemos, por ejemplo, en la concha del nautilus, un molusco. Las sucesivas volutas de la espiral crecen a una tasa aproximadamente igual al número áureo.

Hasta aquí el cuentecito áureo; veamos ahora el plástico. Se parte de un diagrama similar, compuesto esta vez por triángulos equiláteros (*véase la figura 1, abajo*). El triángulo de partida está señalado en gris; los triángulos sucesivos se van añadiendo en el sentido de giro de las agujas del reloj. La espiral generada es, como antes, aproximadamente logarítmica. Para lograr que las figuras ensamblen, los tres primeros triángulos han de tener lado 1. Los dos siguientes tienen lado 2; los números continúan después 3, 4, 5, 7, 9, 12, 16, 21, etc. La regla de formación es, como antes, sencilla: cada número se obtiene despreciando el precedente y sumando los dos que anteceden a éste. En honor de Richard Padovan, voy a llamar sucesión de Padovan a esta secuencia. (Es curioso que Padova sea el nombre italiano de Padua, y que Fibonacci fuera de Pisa, a unos 150 kilómetros de esa ciudad.)



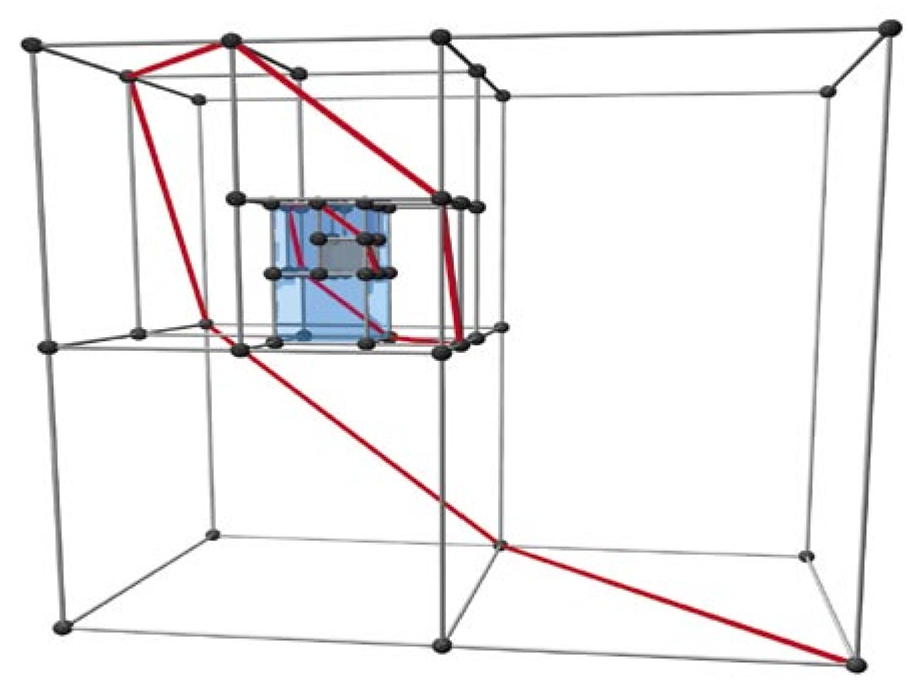
1. Sistemas en espiral, ilustrativos de los números de Fibonacci (arriba) *y de la sucesión de Padovan* (abajo)



2. Espiral logarítmica de la concha del nautilus

La expresión algebraica de las reglas generadoras de las sucesiones de Fibonacci $F(n)$ y de Padovan $P(n)$ es la siguiente: $F(n+1) = F(n) + F(n-1)$, siendo $F(0) = F(1) = 1$, mientras que $P(n+1) = P(n-1) + P(n-2)$, siendo $P(0) = P(1) = P(2) = 1$. El parecido de familia salta a la vista. El número plástico, al que desde ahora denominaré p, y cuyo valor aproximado es 1,324718, aparece como límite de la razón de los sucesivos números de Padovan, de igual forma que el número áureo nace de la sucesión de Fibonacci. La regla de formación conduce a la ecuación $p = {}^{1}/_{p} + {}^{1}/_{p^2}$, o lo que es igual, $p^3 - p - 1 = 0$. El número p es la única solución real de esta ecuación.

La sucesión de Padovan crece mucho más lentamente que la de Fibonacci, porque p es menor que φ. La sucesión de Padovan contiene multitud de regularidades interesantes. Por ejemplo, vemos en la figura que $21 = 16 + 5$, porque triángulos adya-



3. Ortoedros en espiral asociados también a los números de Padovan

centes sobre el mismo lado han de quedar adosados. Por tanto, otra regla equivalente para deducir más términos de la sucesión es $P(n+1) = P(n) + P(n-4)$.

Ciertos números, como 3, 5 y 21, pertenecen a la vez a las sucesiones de Padovan y de Fibonacci. ¿Existen otros? De ser así, ¿cuántos son? ¿Es tal conjunto finito o infinito? Ciertos números de Padovan, como el 9, 16 y 49, son cuadrados perfectos. ¿Habrá otros? En este caso, las raíces cuadradas son 3, 4 y 7, que también son números de Padovan. ¿Se trata de una coincidencia o es una regla general? Estas y otras muchas cuestiones merecen ulterior estudio.

Otra forma de generar números de Padovan consiste en remedar el uso de cuadrados para los números de Fibonacci, pero utilizando estructuras ortoédricas, o sea, cajas de caras rectangulares. Obtenemos ahora una especie de espiral tridimensional formada por cajas (*véase la figura 3*). Se empieza con un cubo de lado 1, colocando otro cubo adyacente a él. El resultado es un ortoedro $1 \times 1 \times 2$. Sobre la cara 1×2 se añade otro de $1 \times 1 \times 2$, con lo que se obtiene un ortoedro $1 \times 2 \times 2$. Después, sobre una cara 2×2, se adosa un cubo $2 \times 2 \times 2$, formando un ortoedro cuyas dimensiones globales son $2 \times 2 \times 3$. A una de las caras 2×3 se le adosa una caja $2 \times 2 \times 3$ a fin de obtener otra de $2 \times 3 \times 4$, y así sucesivamente. Se continúa el proceso, añadiendo siempre ortoedros en la secuencia este, sur, abajo, oeste, norte y arriba. Las tres aristas del nuevo ortoedro formado en cada etapa tendrán por longitudes tres números de Padovan consecutivos.

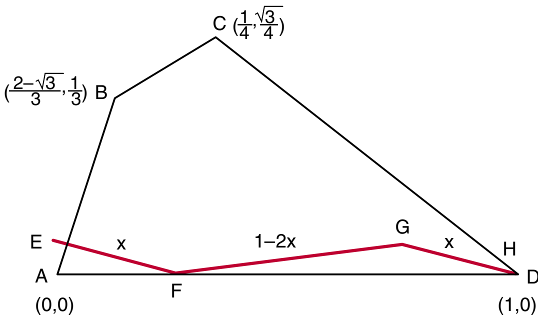
Además, al conectar, mediante líneas rectas, caras cuadradas sucesivas de los ortoedros que se van añadiendo, se dibuja una espiral. Resulta incluso que esta espiral está contenida en un plano. St. George ha basado una escultura en esta construcción, generada con varillas rígidas conectadas en sus extremos mediante bolas perforadas. (¿Qué diagrama forma la intersección del sistema de ortoedros con este plano?)

En 1876, el matemático francés Edouard Lucas estudió una secuencia que obedece a la misma regla de formación, aunque partiendo de valores diferentes. Las ideas de Lucas fueron desarrolladas posteriormente

Acuse de recibo

El acuse de recibo de este mes se acurruca bajo "La manta de Mamá Gusano" [marzo]. Richard Delaware, de la Universidad de Missouri en Kansas City, ha hecho notar que en 1992 Rick Norwood, George Poole y Michael Laidacker encontraron una manta para el gusano, de área 0,27523 (tomado de "The Worm Problem of Leo Moser", en *Discrete and Computational Geometry*, vol. 7, n.º 2, págs. 153-162; 1992). Tal resultado mejora el de Gerriets y Poole citado por mí, que es de 1973.

Puede que tal resultado todavía conserve el récord, porque parece haber un problema con la nueva manta, a saber, el cuadrilátero ABCD (*derecha*). Richard D. Kendon, de Lowdham, de Nottingham, descubrió un gusano que esta manta no puede cubrir. Kendon señala que los ángulos DAB y ADC son de 75 y de 30 grados, respectivamente. Su gusano EFGH está compuesto por tres segmentos rectilíneos. El punto G se encuentra a una distancia x a lo largo de una recta que forma un ángulo GDA = 15 grados, y el punto F se encuentra a una distancia $1-2x$ de G sobre la recta AD. El punto E está a la distancia x de F, de forma que el ángulo EFA es nuevamente de 15 grados. Kendon calcula que cuando $x = 0,01$, por ejemplo, el ángulo EAD es de 75,177 grados. Este ángulo es mayor que 75 grados, por lo que E ha de encontrarse fuera de la manta.



En sí mismo, este resultado no es necesariamente fatal. Cálculos parecidos, sin embargo, descartan cualquier otra posición para este gusano en particular, aun cuando se le diera la vuelta a la manta. Parece, pues, que con la manta ABCD algunos gusanitos sentirán frío en la punta de la nariz.

—I. S.

por R. Perrin, y, en la actualidad, la sucesión se conoce por sucesión de Perrin $A(n)$. Los números de Perrin se diferencian de los de Padovan en que $A(0) = 3$, $A(1) = 0$ y $A(2) = 2$. Lo mismo que antes, la razón de términos de Perrin consecutivos tiende a convertirse en p, pero Lucas observó una propiedad más sutil. Siempre que n sea número primo, $A(n)$ es exactamente divisible entre n. Por ejemplo, 19 es primo, $A(19) = 209$ y $^{209}/_{19} = 11$.

Este teorema proporciona un curioso criterio para saber si un número es compuesto, es decir, no primo. Por ejemplo, cuando $n = 18$ tenemos $A(18) = 158$, y $^{158}/_{18} = 8{,}777$, que no es un número entero. Por consiguiente, 18 tiene que ser compuesto. Podemos, pues, utilizar los números de Perrin con carácter de criterio de no primalidad: todo número n que no divida a $A(n)$ es compuesto.

Y si n divide a $A(n)$, ¿habrá forzosamente de ser primo? Tal proposición no es consecuencia del teorema de Lucas, de igual forma que el enunciado “Si llueve, la calle se moja” no implica que haya llovido si la calle está mojada. (Podría haberla regado el servicio de limpieza.) La cuestión, empero, está abierta y es fascinante. No se ha encontrado todavía un número compuesto n que sea divisor de $A(n)$, pero tampoco se ha podido demostrar que tales números —llamados “pseudoprimos de Perrin”— no existan. En 1991, Steven Arno, del Centro de Investigación sobre Supercomputación de Bowie, en Maryland, demostró que los pseudoprimos de Perrin han de tener cuando menos 15 dígitos. Me encantaría tener noticia de progresos más recientes.

La conjetura de que no existen pseudoprimos de Perrin es importante, porque el resto de la división de $A(n)$ entre n puede calcularse muy rápidamente. Si la conjetura fuese cierta, este resto sería 0 si y solamente si n fuese primo, lo que proporcionaría un criterio de primalidad muy rápido. (De hecho, en 1982, William W. Adams y Daniel Shanks, de la Universidad de Maryland, descubrieron un procedimiento para calcular el resto en $\log n$ pasos.) La conjetura tendría útiles aplicaciones para las claves secretas, que en nuestros días suelen basarse en propiedades de números primos grandes.

Al igual que su reluciente primo áureo, el número plástico, aunque plebeyo, genera ricas espirales de ideas.

Libros

Francesc Illas, Luis Alonso y Laureano Carbonell

Química física

Avanzada

The metal-hydrogen sistem basic bulk properties, por Y. Fukai. Springer Verlag; Heidelberg, 1992.

Los sistemas metal-hidrógeno constituyen un magnífico ejemplo de la diversidad química, puesto que pueden presentar todos los tipos de enlace químico: iónico, covalente y metálico. El estudio de estos sistemas pertenece a la ciencia de materiales, cuerpo doctrinal interdisciplinario que abarca aspectos termodinámicos y, por tanto, ligados a la química física, y aspectos de difracción de neutrones, más propios de la física de materia condensada. La descripción cabal de este tipo de sistemas abarcará, pues, una vertiente termodinámica, otra mecanocuántica y una tercera dinámica, o de los cambios de algunas propiedades con el tiempo.

El libro se compone de seis capítulos organizados en tres grandes bloques. Consta el primero de tres capítulos, donde se abordan las propiedades termodinámicas de los sistemas metal-hidrógeno. En primer lugar, se describen los diagramas de fases y propiedades termodinámicas de sistemas binarios de tipo metal hidrógeno. Puesto que muchos de estos sistemas dan lugar a disoluciones sólidas que presentan diferentes fases, el autor incluye una acotación sobre las estructuras de los hidruros metálicos. Se atiende luego a los sistemas hidrógeno-aleación, deteniéndose en el problema de la solubilidad del hidrógeno en una aleación dada y en los mecanismos que gobiernan dicha propiedad. Se pasa también revista a los modelos estructurales y los cambios de estructura originados por la disolución de hidrógeno en aleaciones metálicas. Para volver a los sistemas binarios metal-hidrógeno, ahora en condiciones extremas de presión y temperatura.

La descripción microscópica se ocupa de las técnicas experimentales utilizadas para recabar información acerca de la naturaleza de dichos sistemas y su interpretación. Importa obtener los centros activos o lugares de la red metálica en los que se encuentran los átomos de hidrógeno, cuyas propiedades vibracionales se estudian.

El libro se adentra luego en problemas en los que el tiempo desempeña un papel decisivo. Al considerar algunos aspectos de la estructura electrónica, el autor utiliza resultados provenientes de la teoría de bandas de los sólidos y también de técnicas especializadas. (F. I.)

El sujeto

En la ciencia

Telling lives in science. Essays on scientific biography. Edición preparada por Michael Shortland y Richard Yeo. Cambridge University Press; Cambridge, 1996.

Les professeurs du conservatoire national des arts et métiers. Dictionnaire biographique 1794-1955. Bajo la dirección de Claudine Fontanon y André Grelon. Institut National de la Récherche Pédagogique; París, 1994. **The values of precision**. Dirigido por M. Norton Wise; Princeton University Press; Princeton, 1994.

Daniel Solander. Collected correspondence 1753-1782. Edición preparada por Edward Duyker y Per Tingbrand. Scandinavian University Press; Oslo, 1995. **The development of biological systematics**, por Peter S. Stevens. Columbia University Press; Nueva York, 1994. **Gregor Mendel. The first geneticist**, por Viteslav Orel. Oxford University Press; Oxford, 1996.

Lise Meitner. A life in physics, por Ruth Lewin Sime. University of California Press; Berkeley, 1996. **Cecilia Payne-Gaposchkin. An autobiogrphy and other recollections**. Edición preparada por Katherine Haramundanis. Cambridge University Press; Cambridge, 1996.

Coinciden estos años de sequía teórica, en que parece que la ciencia ha dado de sí todo lo que podía ofrecer, con la proliferación de biografías. ¿Subterfugio de la mediocridad o renovación de un género? Por lo segundo opta *Telling Lives in Science*, la primera aproximación sistemática de relieve a ese dominio de la historia de la ciencia.

Desde sus orígenes en el siglo XVII las Academias reservaban páginas de sus actas a la memoria de los miembros fallecidos, redactadas de acuerdo con una plantilla extraída de las necrológicas de los monasterios. Muy pronto se multiplicaron recuerdos y retratos, cortados por un patrón hagiográfico que perduró hasta la segunda guerra mundial. La profesionalización de la historia y filosofía de la ciencia, por un lado, y de la sociología de la ciencia, por otro, acabó con esa corriente. Se acusaba al género de centrarse, además, en determinadas figuras.

El neopositivismo cerró el paso a cualquier asomo de subjetividad e introspección. Sólo importaba el producto objetivo, la ciencia, con sus métodos y sus resultados contrastables. La investigación histórica debía limitarse a estudiar las etapas del avance lineal, acumulativo, de las teorías. Por su parte, la sociología de la ciencia diluía el papel del individuo en el magma de las instituciones y la comunidad académica.

Ante semejante descrédito, quienes ahora se esfuerzan en reconstruir la vida de algún autor deben empezar por justificar su trabajo. Thomas Haskins y Larry Holmes, entre otros, hubieron de demostrar la necesidad de adentrarse en los vericuetos de un personaje para entender la estructura fina de su creatividad científica y la de su tiempo. Cierto es que, para ello, se ha de abandonar la retórica laudatoria (o los silencios hipócritas de la historia victoriana) y conocer con más que mediana competencia el dominio de la ciencia implicado para poder amasar, sin que rechine, la teoría de la gravitación con los devaneos alquimistas de Newton, pongamos por caso. Concediendo, además, lo suyo a cuantos allanaron el camino, a los gigantes anónimos sobre cuyos hombros el genio vio más lejos. Los historiadores reunidos en *Telling Lives* exponen de qué forma lo han conseguido ellos con sus biografiados.

Cenicienta de la biografía ha sido la correspondiente a los técnicos. Y más obscura, la de los adscritos a una institución de aparente segundo plano. Aunque sólo fuera por no repetir la injusticia hemos de traer aquí el elenco de *Les professeurs du Conservatoire National des Arts et Métiers*, ente creado en 1794 por la Convención. Treinta años más tarde, a su imagen, se establecía en España el Real Conservatorio de Artes y Oficios, cuya dirección se confió a Juan López de Peñalver.

Principal institución técnica a lo largo del siglo XIX, el Conservatorio Nacional no tuvo alumnos regulares, sino oyentes que acudían con entera libertad, sin control de inscripción ni exámenes de rendimiento. Siempre contó con un plantel de profesores prestigiosos y bien remunerados. Dos rasgos esenciales caracterizan la identidad del Conservatorio Nacional. Por un lado, una enseñanza de alto nivel, dirigida a la aplicación práctica, profesional; por otro, un público mayoritariamente popular, atraído por el rechazo del elitismo.

El proyecto de creación del Conservatorio Nacional se inscribe en el debate sobre instrucción pública de las asambleas revolucionarias de la República instaurada, inseperable del problema que plantea la doble supresión de las cofradías de artesanos y de las congregaciones religiosas. Añádase la imperiosa necesidad de una instrucción rápida de artesanos y obreros para equipar el ejército de los desarrapados ("sansculottes"). Y, por último, el aislamiento económico y diplomático de Francia, en el verano de 1793, que obliga a preocuparse por el fomento de una industria nacional.

En su decreto fundacional, el establecimiento se concibe como un depósito de máquinas, modelos, útiles, diseños, descripciones y libros sobre todos los géneros de artes y oficios. Se encarga a tres expertos —Jean Baptiste Leroy, Nicolas Conté y Alexandre Vandermonde— que enseñen la forma de operar las máquinas a los "ciudadanos". Tras un período de decadencia lo reorganizó Charles Dupin, cuya *Geometría y Mecánica de las Artes y Oficios de las Bellas Artes* tradujo Peñalver para convertirla en libro de referencia del Real Conservatorio. Los libros de agricultura y jardinería españoles se inspirarán en las obras de Louis Moll y Oscar Leclerc-Thouin, que ocuparon las primeras cátedras de la disciplina en el Conservatorio Nacional.

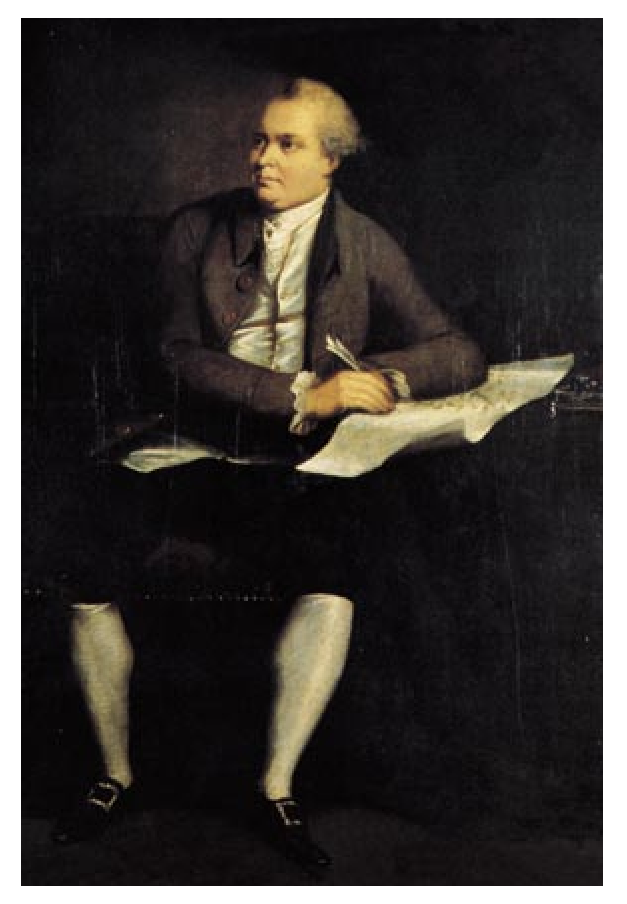
Bajo la dirección de Arthur Morin se instaura la hegemonía politécnica en el Conservatorio. Propone la creación de un laboratorio experimental de mecánica, que desea abrir a los industriales y constructores para sus ensayos sobre las nuevas máquinas. Se erigen cátedras de zoología aplicada, ganada por Emile Baudement, y química aplicada a las artes textiles, concedida a Jean-François Persoz. Pasos que encuentran trasuntos en nuestra nación, que no deja de mirarse en ese espejo.

No entenderíamos las circunstancias que prepararon el nacimiento del Conservatorio Nacional, ni el trasfondo de los biografiados, si ignorásemos el contenido de lo expuesto en *The values of precision*. Entre los patrones guardados en el Conservatorio Nacional destaca "el metro", una barra de platino. Para determinar tal patrón, se creó una expedición geodésica que midiera un cuarto de meridiano terrestre, cuya diezmillonésima de dicha distancia fuera la unidad de longitud. (En esos trabajos intervino, entre otros españoles, el setabense José Chaix.)

En la Francia prerrevolucionaria, y no sólo allí, las medidas variaban casi de una ciudad a otra. Había de 700 a 800 denominaciones métricas distintas, que se expresaban en unas 250.000 variantes locales. Cada mercancía tenía su propia unidad, cuyos valores divergían de una parroquia a otra. En terminar con ese caos y encontrar un sistema métrico universal se comprometieron Condorcet, Prieur de la Côte d'Or, Monge, Borda, Lagrange, Haüy, Delambre, Méchain, Lavoisier y otros. Entre 1790 y 1799 se formaron comités de planificación. Los criterios estaban claros: la norma universal había de tomarse de la naturaleza; las medidas de longitud, superficie, capacidad y peso debían estar relacionadas dentro de un sistema de medidas; la escala decimal dividiría esas unidades en múltiplos y fracciones; por último, era preciso idear una nomenclatura sistemática que expresara la relación de las unidades fraccionarias a la principal.

Aunque *The values of precision* se ocupa de la normalización, los análisis de error, máquinas de cálculo y otros temas de parejo interés, nos ceñiremos a un ejemplo del nuevo rumbo que, en la Francia pre- y revolucionaria, había tomado la ciencia de la medición: la confección del censo. La monarquía absoluta recurrió frecuentemente a censos y catastros. Al no disponer de una infraestructura burocrática, se apoyaba en los párrocos, que llevaban registro de bautismos, bodas y fallecimientos. Entrados ya en la segunda mitad del XVIII, los dos modelos usuales de estimar la población se basaban en un multiplicador universal. El primer modelo atendía al número de hogares, tomado del registro de impuestos y multiplicado por el número de componentes de la unidad familiar: 4 o 5. En el segundo método, el número de nacimientos anuales tomados de los archivos parroquiales y multiplicado por un número, entre 25 y 28, que daba la cifra total de población. Esta cifra se obtenía de un censo de varias parroquias pequeñas y estableciendo la proporción entre nacimientos y población total.

La idea del multiplicador universal reviste interés por sí misma. Los



Daniel Solander (1733–1782)

autores del XVIII discuten sobre el número en concreto pero no critican su empleo. Se objeta la apoyatura en el registro de impuestos: muchos intentan evadirlos. Otros no se fían de los archivos parroquiales. Tampoco es exacto el valor medio de miembros de la unidad familiar para todo el territorio. Pierre-Simon de Laplace resolverá esa manifiesta aporía: en su opinión los cálculos producían sólo estadísticas probables, no exactas, y lo que importaba era reducir el grado de imprecisión. Por tanto, para obtener un multiplicador universal preciso, había que obtener censos suficientemente extensos y cuidadosos. Abogaba por el cálculo fundado en el número anual de nacimientos: la razón entre la población y los niños que nacían cada año.

Elevémonos de la aplicación técnica a la teoría. Al progreso en el conocimiento de las plantas a través de tres figuras señeras: Daniel Solander, Antoine-Laurent Jussieu y Gregor Mendel. La fama de Daniel Solander ha quedado desdibujada por la sombra de Joseph Banks, a quien acompañó en el viaje de James Cook a bordo del *Endeavour*, del que trajeron un notabilísimo tesoro de historial natural. Pocos saben de su papel catalizador de la Ilustración inglesa y su impulso decisivo en la adopción del sistema linneano en Europa. De esa ignorancia nos libra la publicación de *Daniel Solander. Collected Correspondence 1753-1782*.

Hijo y nieto de pastor protestante, Solander nació en 1733 en Pitea, ciudad costera del norte de Suecia. Los Solander era una de las pocas familias cultas de la región, y en su casa se hospedó Linneo durante su viaje herborizador a Laponia. Andando el tiempo, el vástago, decidido a estudiar historia natural, acudió a Upsala para formarse con el amigo de su padre. Allí vivió nueve años.Tras realizar esporádicas expediciones por la península escandinava, se trasladó a Inglaterra.

Solander puede contarse entre los fundadores de la botánica y zoología del Pacífico suroriental. Aunque se perdió buena parte del número de especímenes traídos del viaje de circumnavegación, es conocido que, sólo en la cuenca del Pacífico, Banks y Solander describieron 222 especies de peces hasta entonces desconocidas. Publicó muy poco, pero describió y catalogó la colección de historia natural del Museo Británico y la del museo de Joseph Banks. Sobre todo, respondió a consultas mil de la sociedad científica británica. De esto último da cumplida cuenta el epistolario.

Ninguna compilación epistolar suele ser completa. Por otras fuentes sabemos de su carteo con Samuel Johnson, James Boswell, John Fothergill, David Hume, Johan Gerard Konig, Fanny Burney y Benjamin Franklin, sin que haya aparecido ningún fragmento de las misivas. La correspondencia aquí presentada se divide en varias partes. La primera abarca las cartas escritas o recibidas en Suecia. Hay un doble motivo de interés en este mazo inicial: el anuncio del *Species plantarum* de Linneo y su correspondencia con Pehr Löfling, a la sazón en Madrid, gracias a la cual conocemos de primera mano la situación de la botánica en nuestro país. A instancias de Löfling, amigo de Cristóbal Vélez, Linneo dio nombre a los géneros *Minuartia* y *Queria*. Por cierto, los compiladores, tan puntillosos con otros personajes, ignoran quiénes fueron Minuart y Quer.

La segunda parte contiene la correspondencia de sus dos primeros años y medio en Londres. Vuelven a destacar las cartas a Linneo. Estas, junto con las remitidas a John Ellis, reflejan el interés de quienes acopiaban y cultivaban plantas que ahora las damos por normales y entonces constituían rarezas botánicas: la floración de una magnolia, la denominación de las gardenias o la adquisición de semillas de ruibarbo adquieren aquí proporciones insospechadas. La parte tercera, que cubre su incorporación en el Museo Británico y su circumnavegación en el *Endeavour*, recoge el período más importante en la vida de Solander, cuya prolongación en la parte cuarta nos mide el pulso de la comunidad científica (Banks, Ellis, James Lind y William Hunter).

El método linneano de Solander tomó un giro decisivo en la reforma acometida por el benjamín de los Jussieu, estudiada por Peter F. Stevens en *The Development of Biological Systematics*: *Antoine-Laurent de Jussieu, Nature, and the Natural System*. Reforma que encontró duros oponentes, como el propio Banks, aspecto éste que se le escapa al autor. Antoine-Laurent de Jussieu (1748-1836) publicó el nuevo credo en *Genera plantarum secundum ordines naturales disposita*, aparecida en 1789 aunque gestada durante largos años, como nos revela Cavanilles, punto también olvidado por Stevens.

Aporta allí descripciones de todos los géneros de plantas conocidas, subsumidos en cien familias. Unos y otras respondían a la disposición natural de los vegetales, a las supuestas relaciones de parentesco. El método respondía a la organización o estructura en la naturaleza. La idea maestra que hilvana las categorizaciones se conoce por principio de continuidad; con él se niega que existan hiatos en la serie vegetal. El principio de continuidad se complementaba con el de plenitud, en razón del cual existían todas las formas intermedias, aunque no se hubieran encontrado, entre un grupo y otro.

A finales del XVIII se consideraban artificiales todas las clasificaciones, pues procedían de manera analítica, por subdivisiones sucesivas. Jussieu siguió un enfoque sintético, de formación de grupos cada vez más extensos. La agregación de especies emparentadas originaba los géneros, cuya reunión constituía las familias. Para acotar un grupo, establecía una jerarquización de los caracteres, ya que no todos tenían el mismo peso en sistemática. Su subordinación posibilitaba identificar los peldaños de la escala de la naturaleza, que progresaba de las formas más sencillas a las más complejas a través de nexos engarzadores.

Vinculó los rasgos morfológicos externos a la anatomía interna. Creía que el alburnum (albura) y el liber (floema, probablemente) se desarrollaban en la interfaz de la corteza y la médula, y que los cambios iniciales en la cantidad y pureza de la savia determinaban el crecimiento ulterior de la planta. Con otros botánicos de su tiempo, admitía la continuidad de la corola con el líber (no con la epidermis cortical) y la conexión entre la duplicación de las flores y el nivel de nutrición de la planta. Sostenía que la semilla era un "compendium" de la planta futura.

Qué había en ese compendio fue objeto de las rigurosas y sistemáticas investigaciones de un monje agustino, cuya vida, tiempo y obra traza Viteslav Orel en *Gregor Mendel. The first Geneticist*. Primero tiene aquí un sentido estricto, como Orel se encarga de mostrar en una documentada introducción. Informaciones aisladas sobre la aparición de nuevas variedades por cruzamiento pueden hallarse en el siglo XVII. Una centuria más tarde, M. Duhamel y P. Miller daban cuenta de la aparición de nuevas especies a partir de los cruzamientos. J. G. Kölreuter, tras confirmar experimentalmente la sexualidad de las plantas, describe la uniformidad de los híbridos y la segregación de los caracteres de los progenitores en la descendencia. Andrew Knight escribía en 1799 que la planta ideal

para los ensayos de cruzamiento era el guisante común, “no sólo porque podían obtenerse muchas variedades, de formas, tamaños y colores diferentes, sino también debido a la estructura de su yema, evitando la introducción de harina (polen) adventicia.”

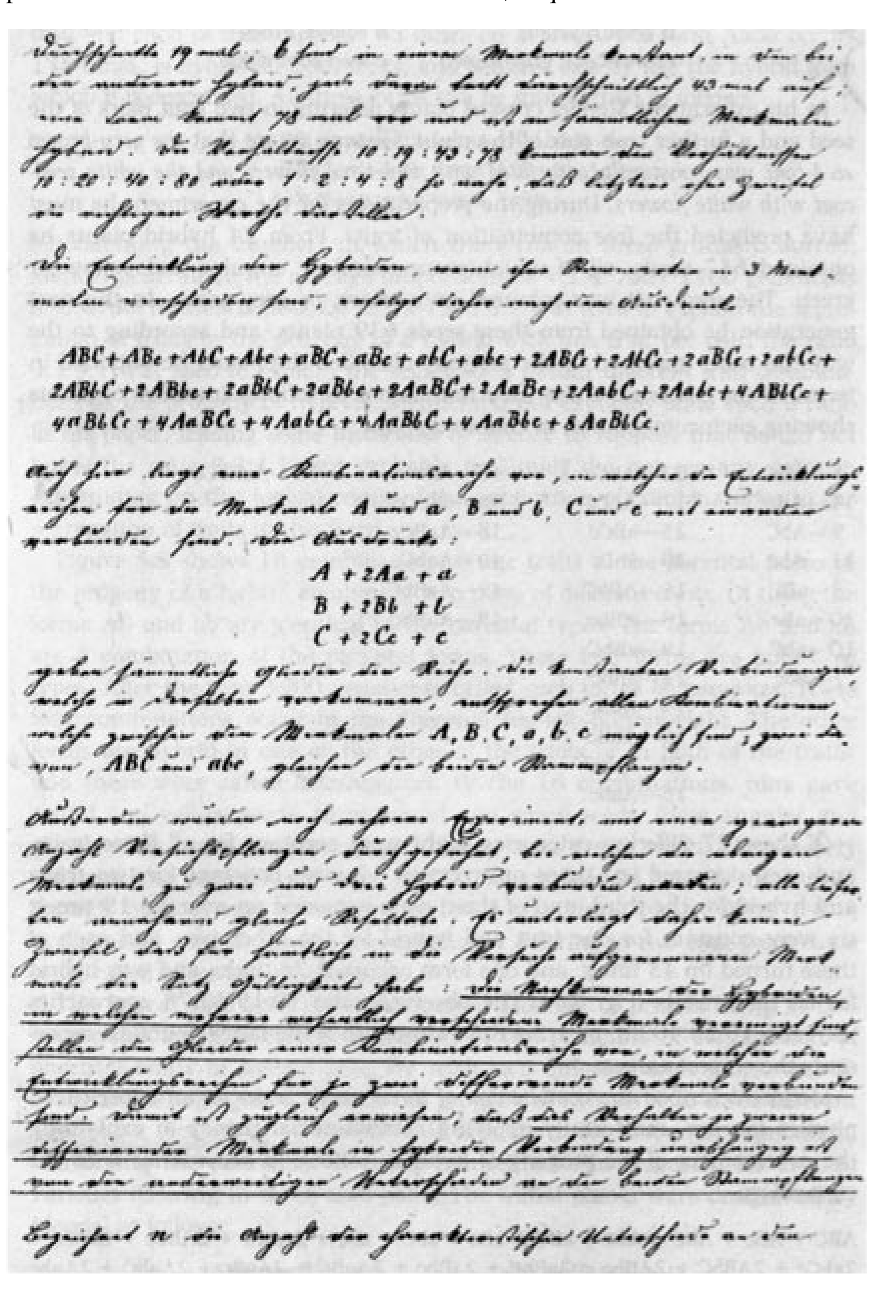
En el ecuador del siglo XIX se había avanzado bastante. F. G. Gärtner había realizado 10.000 fecundaciones artificiales en 700 especies vegetales, produciendo numerosos híbridos diferentes. Llegó a la conclusión de que los híbridos experimentaban una pérdida de fecundidad. Gärtner rechazó la idea de que los híbridos naturales originaran especies nuevas. Jan Evangelista Purkyne estableció, por su parte, que en el proceso de fecundación ocurría la fusión de las “substancias germinales” de los progenitores. Franz Unger, maestro de Mendel, y Carl Nägeli iniciaron sus trabajos sobre la hibridación de las plantas en las universidades de Viena y Munich, respectivamente. Buscaban hallar los fundamentos de la variabilidad de los caracteres y el origen de nuevas especies.

Los experimentos de hibridación de las plantas respondían en Mendel a un programa a largo plazo, en el que los experimentos con *Pisum* constituían sólo una primera fase. Los resultados que obtuvo le permitieron investigar formas más complejas de la transmisión de los caracteres de los progenitores a la descendencia con otras especies vegetales. En sus ensayos con guisantes investigó el origen y desarrollo de híbridos variables con respecto a siete pares de caracteres: forma de las semillas maduras (lisa o rugosa), coloración del albumen (endospermo) de las semillas maduras (amarillo pálido o amarillo brillante), coloración de la piel de la semilla madura (blanca o gris), forma de la vaina madura (arqueada o hendida), coloración de la vaina sin madurar (apenas coloreada o de un amarillo intenso), posición de las flores (axilares o al final del tallo), diferencias en la longitud del tallo (de más de un metro o inferior a medio metro).

Empezó por cruzar variedades de *Pisum* que diferían en la forma y color de las semillas. Introdujo el análisis numérico para dar expresión cuantitativa a caracteres cualitativos. Llegó así a la conclusión de que esos caracteres paternos se segregaban en los híbridos en una razón de 3:1. Puesto que la forma redondeada había prevalecido sobre la angular llamó *dominante* a la primera y *recesiva* a la segunda, porque se había retirado temporalmente de la vista. Esa proporción correspondía a la primera generación. El carácter dominante podía tener un significado referido a los progenitores y otro referido a los híbridos. En cada generación la descendencia de los híbridos se desdoblaba en forma híbrida y forma constante en una proporción 2:1:1. Empleó símbolos alfabéticos para denotar caracteres dominantes y recesivos; aquéllos en mayúsculas, éstos en minúsculas. Para la progenie de los híbridos, por ejemplo, derivó la expresión matemática A + 2Aa + a, la serie simple que implicaba la razón de segregación 3:1 de los fenotipos y la 2:1:1 de los genotipos.

Investigó luego si la ley deducida para un solo carácter se mantenía en dos o más caracteres. Llegó así a la serie combinatoria. Las expresiones matemáticas de Mendel se incorporaron, desde 1900, en la enseñanza de la genética, para convertirse en proceso estándar del diseño de experimentos y predicción de la aparición de la combinación de caracteres. Su explicación de la segregación de los caracteres parentales en los híbridos descendientes y la combinación aleatoria de cualquier número de caracteres pasaron a convertirse en Ley (o Principio) de Mendel sobre la segregación y Ley (o Principio) de Mendel sobre el reparto independiente de caracteres.

Si pagamos tributo a la moda del papel de la mujer en el mundo académico, lo que ahora ha dado en llamarse



ABC + ABc + AbC + Abc + aBC + aBc + abC + abc + 2ABCc + 2AbCc + 2aBCc + 2abCc + 2ABbC + 2ABbc + 2aBbC + 2aBbc + 2AaBC + 2AaBc + 2AabC + 2Aabc + 4ABbCc + 4aBbCc + 4AaBCc + 4AabCc + 4AaBbC + 4AaBbc + 8AaBbCc.

A + 2Aa + a
B + 2Bb + b
C + 2Cc + c

Manuscrito de Mendel perteneciente a sus trabajos de hibridación

"género y ciencia", procuremos que la alcabala sea al menos justa. No nos equivocaremos si nos detenemos en *Lise Meitner. A life in physics* y la autobiografía *Cecilia Payne-Gaposchkin*. Ruth Lewin Sime ha escrito una impresionante biografía de la primera, con un punto de apasionamiento como se refleja en las excesivas páginas que consagra al silencio sobre su intervención en el descubrimiento de la fisión nuclear. En efecto, hasta los noventa podía observarse en el Museo Alemán de Munich la reconstrucción del laboratorio donde se descubrió la ruptura del núcleo, atribuyéndola a Otto Hahn (lo que valió el Nobel de 1944) y otorgando crédito menor a Fritz Strassmann, con ignorancia absoluta del tercer miembro del equipo de investigación, y teórico del grupo, Lise Meitner.



Lise Meitner (1878–1968)

Lise nació en Viena en 1878. A los catorce años había terminado la escolaridad oficial para niñas. Esa barrera se levantó más tarde y en 1901 pudo entrar en la universidad. Delgada y menuda, con una expresión distraída y profundos ojos obscuros, aparentaba tener menos de sus 23 años. Con ganas de recuperar el tiempo perdido, se matriculó en física, cálculo, química y botánica. En su primer curso de física tuvo por profesor a Franz Exner, amigo de Wilhelm Röntgen, y uno de los primeros en interesarse por la radiactividad. A lo largo de los seis semestres siguientes, estudió mecánica analítica, electricidad y magnetismo, elasticidad e hidrodinámica, acústica, óptica, termodinámica y teoría cinética de los gases, así como física matemática cada semestre y un curso de filosofía de la ciencia. Un plan de estudios bastante normal, salvo en un aspecto insólito: todo ello era enseñado por una sola persona, Ludwig Boltzmann.

Aconsejada por Boltzmann, Meitner marchó a Berlín para estudiar con Max Planck. Las clases de éste no le ocupaban excesivo tiempo y buscó un lugar donde realizar trabajo experimental. Así empezó su trabajo con el joven químico Otto Hahn, colaboración que iba a durar treinta años. Para su primera investigación, Hahn y Meitner decidieron inspeccionar todas las fuentes radiactivas beta-emisoras a su alcance. Tal estudio era necesario, así creían, porque los resultados obtenidos por diferentes científicos no casaban. Midieron las características de absorción de fuentes beta pura y de mezclas: mesoterio 1 y 2, los depósitos activos de torio y radio, uranio X (^{234}Th), plomo radiactivo (^{210}Pb) y radio E (^{210}Bi). En abril de 1908 enviaron sus resultados al *Physikalische Zeitschrift*.

Pero sin duda el proyecto conjunto donde descolló la habilidad técnica y potencia teórica de Meitner fue la búsqueda de la substancia "madre", el precursor inmediato del elemento actinio. Escasísimo, el actinio era con mucho el menos conocido de los elementos radiactivos: se ignoraba su peso atómico, su química y su vida media. Cinco años dedicaron al empeño. En un artículo antológico, "La substancia madre del actinio, un nuevo elemento radiactivo de vida media larga", publicado por *Physikalische Zeistschrift*, escribían que la pechblenda era un material de partida idóneo. Esa carrera prometedora la abortaron los nazis.

Muy otra fue la fortuna de la astrónoma Cecilia Payne-Gaposchkin (1900-1979). Pudo entrar muy pronto en la universidad y no sufrió persecución racial que truncara su carrera. En 1923, tras terminar sus estudios de licenciatura en la Universidad de Cambridge, se trasladó al Observatorio de Harvard. Dos años después recibía en Radcliffe el doctorado en astronomía con la tesis *Stellar atmospheres: a contribution to the observational study of high temperature in the reversing layers of stars*. A propósito de esta monografía se ha escrito que "se trata, sin la menor duda, de la tesis doctoral más brillante que se ha escrito sobre astronomía". Demuestra en ella que las estrellas normales presentan la misma composición química, en la que dominan el hidrógeno y el helio, conclusión tan inesperada que, siguiendo el consejo de Henry Norris Russell y Harlow Shapley (su tutor oficial), atribuyó las líneas intensas del hidrógeno a una "excitación anómala". En plena efervescencia juvenil incorporaba en su estudio las recientes aportaciones de R. H. Fowler y E. A. Milne. Y las de un español: al poco de llegar a Harvad, Russell le había dado a conocer los multipletes de Catalán.

Para preparar su trabajo de grado, estudió la gama entera de espectros estelares. Halló que la temperatura crecía regularmente desde las estrellas más rojas hacia las más azules. La teoría de la ionización podía explicar, pues, muchos aspectos de los espectros estelares. Los resultados eran tanto más desconcertantes cuanto más atañían a las estrellas que le interesaban a Payne, las estrellas de temperatura más elevada. Las estrellas de esta clase, conocidas como estrellas O, muestran característicamente las líneas del helio ionizado en sus espectros. En un artículo de noviembre de 1924, Payne presentaba sus mediciones de las líneas de absorción de 38 estrellas O. En diciembre de 1924, envió a Russell el primer borrador de un artículo sobre la concentración relativa de los elementos en atmósferas estelares. Suponía que las estrellas de todas las clases eran químicamente semejantes, aunque divergían en el grado de ionización de sus átomos. En sus cálculos, empleó la escala de temperaturas escalares que había deducido a partir de la teoría de la ionización. Además, obtuvo datos de 20 de entre los 25 elementos más abundantes en la corteza terrestre.

Los cálculos de Payne resultaron asombrosos. Los átomos de silicio, carbono y metales comunes se hallaban en casi la misma concentración relativa en las atmósferas estelares y en la Tierra. Pero el helio abundaba más en las estrellas que en la Tierra. Además, los átomos de hidrógeno, que en la corteza terrestre venían a triplicar el número de los átomos de un metal común como el aluminio, en las atmósferas estelares multipli-

caba su concentración un millón de veces. De todo ello se infería que las atmósferas estelares constaban principalmente de hidrógeno y helio, con trazas de otros elementos. Con esos mimbres tejió la tesis, que valió por una vida. (L. A.)

Arquitectura naval

Española

RETRATO DE UN NAVÍO. NUESTRA SEÑORA DEL PILAR DE ZARAGOZA DE LA CARRERA MANILA-ACAPULCO (1733-1750), por J. García del Valle Gómez. Editorial Naval; Madrid, 1993.

El protagonista de esta obra es un navío, la fábrica más compleja de la época y en cuya construcción y manejo participaban casi todas las ciencias y artes de la primera mitad del siglo XVIII. Prologado por A. M. Molina, el libro consta de dos partes; en la primera se expone la historia del navío, con particular detenimiento en el galeón de Manila, y, en la segunda se ocupa de la construcción y aparejo modelo del *Nuestra Señora del Pilar de Zaragoza*.

Al resumir la historia de la carrera de Filipinas, recuerda el autor la aportación de Andrés de Urdaneta con el descubrimiento de la derrota más conveniente para el tornaviaje. La dificultad del regreso a Nueva España había sido el mayor problema de la empresa y la causa de muchos fracasos. La solución dada por Urdaneta consistía en remontar en latitud hasta algo más al norte del límite septentrional de la zona de los alisios de nordeste, para navegar por donde prevalecen los vientos de poniente, en vez de correr paralelo y aprovechar los alisios de nordeste, como se hacía en el viaje de ida. Explica también la fórmula de reparto de la capacidad de carga de la nave entre los residentes en las islas, autoridades y tripulantes, así como los límites fijados al valor total del cargamento, tanto en el viaje de ida como en el de vuelta.

La mayor parte de la documentación empleada se refiere al navío *Nuestra Señora del Pilar de Zaragoza*. Su exceso de carga y la falta de estabilidad determinaron que jamás llegara a su destino. La carrera, prosigue, se suprimió entre 1762 y 1764, como consecuencia de la ocupación inglesa de Manila, y terminó en 1815.

F. A. Garrote impulsó, en 1691, el arte de la construcción naval al propugnar el incremento de la relación entre la eslora y la manga. A éste le siguió A. de Gaztañeta e Iturribalzaga, con sus *Proporciones de las medidas mas essempciales ... para la Fabrica de Navios, y Fragatas de Guerra* de 1720, según las cuales se construyeron varios navíos de la Real Armada y en cuyas proporciones se inspiraron Inglaterra, Francia y Holanda. En el transcurso del siglo XVIII la obra de Gaztañeta fue retocada y mejorada con las aportaciones de Jorge Juan, Francisco Gautier, José Romero Fernández de Landa y Julián de Retamosa. En esencia, las innovaciones de Gaztañeta fueron la sustitución de la manga por la eslora como magnitud fundamental del navío, el incremento de la eslora y de su relación con la manga y el hacer el casco menos alteroso. Con todo ello pretendía que las naves tuvieran un buen gobierno y fueran obedientes al timón; una gran capacidad de aguante de vela en todo tiempo; una buena ceñida, sin excesivo abatimiento; una buena estabilidad y mucha facilidad de maniobra, incluso con mal tiempo; un buen andar, aun con vientos de poca intensidad; y que la artillería de la primera batería, es decir, la más baja y próxima a la superficie del agua, estuviera bien floreada incluso con el navío cargado.

Se incluye el plano de formas del navío *Nuestra Señora del Pilar de Zaragoza*, cuyo trazado justifica indicando los documentos en que se ha basado. Sigue las pautas dictadas por Gaztañeta para un navío de igual porte, o sea 50 cañones, y suple algunos detalles que faltan por los correspondientes a los de 70, aunque debidamente proporcionados. Aclara también que alguna solución, como es el de aplicarle un tercer cintón a los dos indicados por aquel, la ha tomado de la *Navegación especulativa y práctica* de González-Cabrera Bueno. Otros detalles, en cambio, proceden de la obra del sueco F. H. Chapman, *Arquitectura Navalis Mercatoria* y del "Diccionario demonstrativo ... de la Architectura Naval ...", manuscrito de J. J. Navarro.

Presta detenida atención a las dimensiones de las piezas y componentes del buque. Le sigue un estudio de las maderas filipinas que debieron de emplearse en la construcción, e indica sus características, sin omitir el uso de algunas de ellas que testigos de otras marinas las consideran como impenetrables a los proyectiles de artillería. Este hecho permite deducir que los proyectiles no producirían el desprendimiento de astillas, que, durante el combate, eran las causantes de gran parte de las bajas de la tripulación.

El plano del navío una vez terminado y el de la representación del interior con la carga que llevaba en el viaje a Acapulco en 1738 son ilustraciones de marcado interés. El último capítulo versa sobre el aparejo, cuyos elementos —arboladura, jarcia y velamen— están deducidos de las obras de González-Cabrera y Navarro. Luego, se pormenoriza el proceso de aparejado del navío, empezando por el arbolado de palos, masteleros y vergas, seguido de la colocación de la jarcia firme y de labor y finalmente de las velas y su jarcia. (L. C.)



Nuestra Señora del Pilar de Zaragoza

Ideas aplicadas

Robert E. Resh

Almohadillas neumáticas

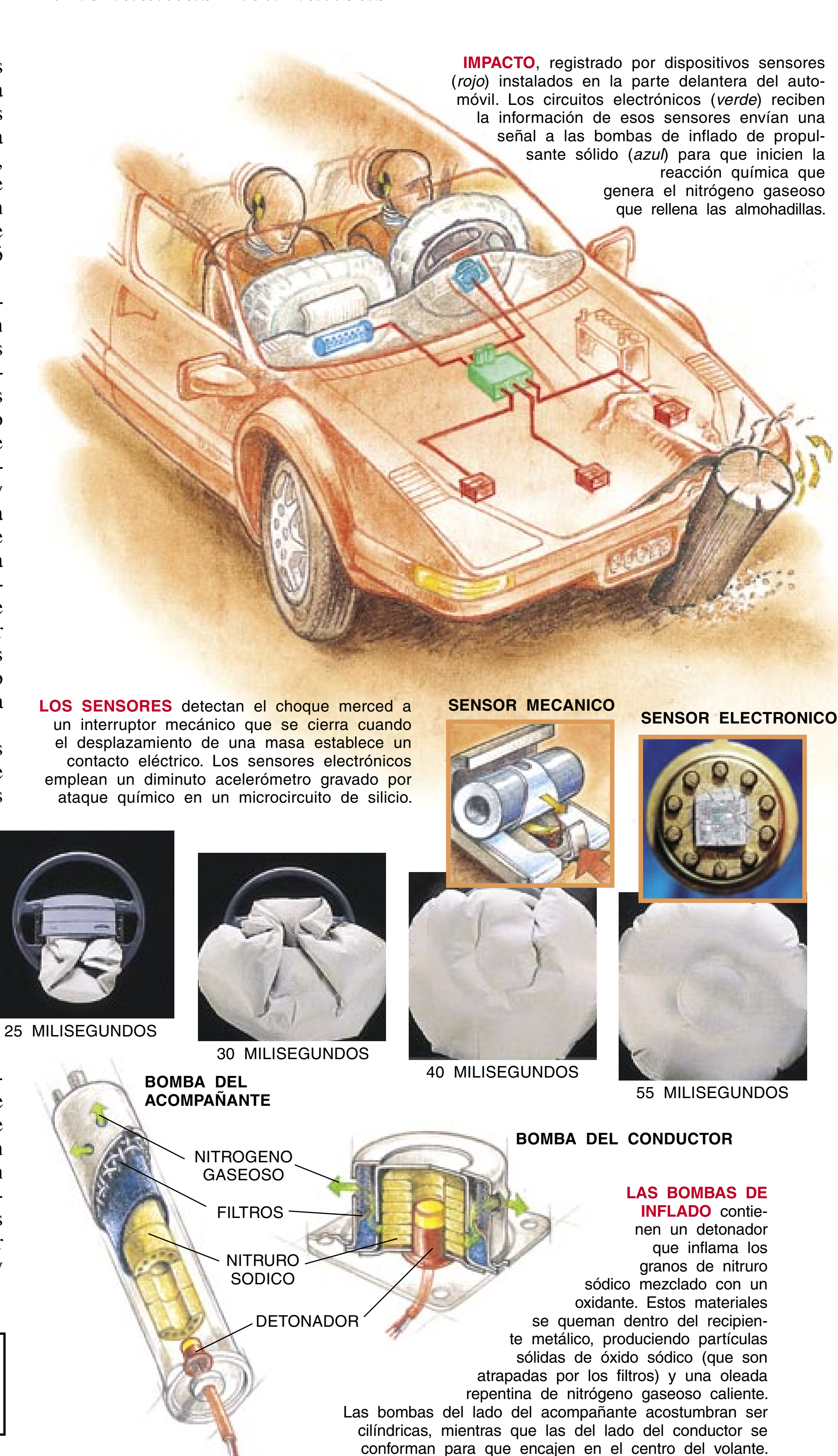
Antes de que muchos países los hicieran obligatorios, la idea de dotar a los automóviles de un cojín de inflado rápido para frenar el impacto de las colisiones, arrastraba una larga historia. Lo que constituyó la primera patente de un "dispositivo inflable para el aterrizaje accidentado de aeronaves" se solicitó durante la II Guerra Mundial.

Las almohadillas neumáticas para vehículos ("air bags") que se desarrollaron durante los dos decenios siguientes contenían no pocas de las características de los modelos actuales. Pero los prototipos iniciales eran todos poco fiables y carísimos. Desde el punto de vista técnico, los principales obstáculos radicaban en el almacenamiento y liberación del aire comprimido. ¿Había espacio suficiente para un recipiente de gas? ¿Conservaría el gas la alta presión durante toda la vida del vehículo? ¿Y cómo conseguir que se expandiera rápidamente y sin fallar bajo toda una variedad de condiciones de temperatura? Y sobre todo, ¿cómo evitar que la detonación no ensordeciera a los pasajeros?

Las soluciones vinieron, en los años setenta, de la mano de las bombas de inflado de propulsante sólido. Estos dispositivos inician una reacción química que libera nitrógeno gaseoso caliente dentro de la almohadilla. Gracias a ésta, los coches empezaron a contar con almohadillas neumáticas en los años ochenta.

Se calcula que, sólo en 1995, las almohadillas neumáticas evitaron unas 600 muertes en Estados Unidos. Conforme crezca el número de vehículos equipados con almohadillas neumáticas, paralelamente crecerá el número de vidas que salve esta técnica. Los ingenieros prosiguen diseñando almohadillas que protejan mejor a los pasajeros de los automóviles a la vez que investigan nuevas fuentes de gas que permitan reducir las dimensiones de los dispositivos y faciliten más su reciclado.

Robert E. Resh pertenece a la dirección técnica de TRW Vehicle Safety Systems, de Washington (Michigan).



IMPACTO, registrado por dispositivos sensores (*rojo*) instalados en la parte delantera del automóvil. Los circuitos electrónicos (*verde*) reciben la información de esos sensores envían una señal a las bombas de inflado de propulsante sólido (*azul*) para que inicien la reacción química que genera el nitrógeno gaseoso que rellena las almohadillas.

LOS SENSORES detectan el choque merced a un interruptor mecánico que se cierra cuando el desplazamiento de una masa establece un contacto eléctrico. Los sensores electrónicos emplean un diminuto acelerómetro gravado por ataque químico en un microcircuito de silicio.

LAS BOMBAS DE INFLADO contienen un detonador que inflama los granos de nitruro sódico mezclado con un oxidante. Estos materiales se queman dentro del recipiente metálico, produciendo partículas sólidas de óxido sódico (que son atrapadas por los filtros) y una oleada repentina de nitrógeno gaseoso caliente. Las bombas del lado del acompañante acostumbran ser cilíndricas, mientras que las del lado del conductor se conforman para que encajen en el centro del volante.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LOS TAXOIDES, NUEVAS ARMAS CONTRA EL CANCER, por K. C. Nicolaou, Rodney K. Guy y Pierre Potier

Los químicos, tras haber desarrollado el taxol, utilizado como medicamento contra el cáncer, trabajan ahora sobre otros compuestos semejantes que tengan propiedades anticancerígenas.

LA PROXIMA GENERACION DE DISCOS COMPACTOS, por Alan E. Bell

Un memorable acuerdo entre empresas competidoras ha dado como resultado la creación de un nuevo disco digital versátil (DVD), compatible con los actuales. Los primeros llegarán al mercado este otoño.

TECNICA DEL LASER AZUL PARA DISCOS COMPACTOS, por Robert L. Gunshor y Arto V. Nurmikko

No es nada fácil conseguir que cristales semiconductores emitan luz láser de color azul. Pero la ampliación de la capacidad de almacenamiento de los discos ópticos bien merece el esfuerzo.

EL TEJIDO ADIPOSO PARDO, por Marisa Puerta

Aunque la función principal del tejido adiposo pardo sea la de defensa frente al frío, desempeña también un papel importante en el equilibrio energético del animal.

SENSORES DEL EXOSQUELETO Y LOCOMOCION, por Sasha N. Zill y Ernst-August Seyfarth

Cucarachas, cangrejos y arañas cuentan, para mover sus apéndices, con órganos del exosqueleto que actúan como sensores de flexión. El estudio de su locomoción puede facilitar el diseño de robots dotados de múltiples patas.

LA NATURALEZA DEL ESPACIO Y EL TIEMPO, por Stephen W. Hawking y Robert Penrose

Dos teóricos relativistas presentan sus distintos puntos de vista sobre el universo, su evolución y las repercusiones de la teoría cuántica.

LA INTRODUCCION DEL ALFABETO EN JAPON, por Florian Coulmas

La escritura alfabética de los primeros europeos llegados a Japón resultaba completamente desconocida para los japoneses. La recepción del alfabeto fue un proceso que duró varios siglos y todavía hoy conserva cierto aire de modernidad exótica.

ASPECTOS ARCANOS DE LA CIRUGIA, por Max Aguilera-Hellweg

Las detalladas imágenes que un fotógrafo ha tomado de operaciones quirúrgicas revelan aspectos desconocidos de nosotros mismos.

LA MAYOR EXTINCION BIOLOGICA CONOCIDA, por Douglas H. Erwin

La extinción generalizada de especies que se produjo al final del periodo Pérmico, hace unos 250 millones de años, causó los mayores estragos de la historia de la Tierra y supuso un cambio fundamental en el desarrollo de la vida.

